Gheorghe Vass

BAZELE ASTRONOMIEI

Notă asupra ediției

Această ediție, prima, probabil şi ultima, apare sub formă electronică, la inițiativa şi cu ajutorul **Astroclubului** Bucureşti, printre membrii fondatori ai căruia am onoarea să mă număr.

Am început să scriu cartea de față în anul 1998, gândind că va fi utilă cu ocazia eclipsei totale de Soare din 1999. Însă, în aceeaşi perioadă, am inițiat un program educațional destinat pregătirii populației şcolare în vederea eclipsei, program intitulat ORA ASTRALĂ A ROMÂNIEI. Finanțarea acestuia de către Fundația Soros i-a asigurat un succes neaşteptat, dar m-a obligat pe mine să orientez tot ceea ce scriam către cerințele acestui program.

Toate textele redactate au fost difuzate în cadrul programului sub forma câtorva zeci de "fişe pedagogice", destinate în primul rând cadrelor didactice. ORA ASTRALĂ a avut un succes deosebit (s-au creat şase centre de astronomie, dotate cu câteva zeci de telescoape şi alte echipamente), dar eu nu am mai avut puterea de a relua scrierea *acestei* cărții.

Includerea mea în colectivul de lectori care, în anul şcolar 2005 – 2006, au susținut tradiționalul Curs de Astronomie de la Observatorul Astronomic "Amiral Vasile Urseanu", a prilejuit din nou utilizarea materialului redactat pentru carte, material care a constituit, împreună cu alte lucrări (publicate, acestea din urmă, de mine), suportul părții de curs a cărei ținere mi-a revenit.

Prin urmare, textul de față trebuie să fie luat în considerare cu rezerva că el este doar un **manuscris în lucru**, utilizat de autor în calitate de **note de curs**.

Autorul

Cartea este dedicată celor care, într-un fel sau altul, au făcut-o posibilă:

Părinţilor,
profesorilor
şi elevilor mei,

precum şi, *last but not least*,

Soţiei mele, Gabriela*.*

Autorul

Motto:

Orice carte este un raţionament.

Nae Ionescu, *Curs de logică*

Atenţionare importantă: Date fiind condiţiile în care a fost publicată această ediţie, erorile de diferite naturi sunt foarte probabile. Cititorului îi revine sarcina de a fi critic în fiecare fază a lecturii şi de a recepţiona întâi *mesajul*, iar abia apoi *litera* cărţii. Semnalarea posibilelor erori către editori (autorul, sau Astroclubul Bucureşti) ar fi considerată ca un gest de apreciere de către aceştia.

PREFAȚĂ

Astronomia, ca orice ştiință, poate fi privită din mai multe puncte de vedere. Mai întâi, o putem considera ca fiind o *sumă* de cunoştințe constituite şi, în acest caz, ne interesează să cuprindem cât mai mult din totalitatea cunoştințelor existente la ora actuală.

Pe de altă parte, putem vedea în astronomie un *mecanism* creat de oameni pentru a obține cunoştințe despre Univers; în acest caz, ne interesează *alcătuirea* mecanismului respectiv, modul în care el se dezvoltă din inteligența comună tuturor oamenilor, modul în care apar ideile specifice astronomiei, *modul în care se obțin* cunoştințele noi, neaşteptate pentru bunul-simț comun.

Autorul propune cititorului să adopte această din urmă viziune asupra astronomiei şi se va strădui să-l ghideze pe cititor în încercarea *acestuia* de a descoperi *mecanismele* ştiinței despre Univers.

Astronomia, ca toate ştiințele, s-a dezvoltat din experiența comună a oamenilor, iar depăşirea experienței comune s-a realizat în timp îndelungat, prin urmărirea atentă a fenomenelor cereşti, prin încercările de prezicere a acestora şi prin critica tot mai aprofundată a succeselor şi insucceselor de predicție.

Astronomii au ajuns astfel, treptat, să distingă *iluziile* de *realități*, să poată cunoaşte realitățile ascunse de aparențele cereşti; sintetizând, am putea spune că **astronomia este *ştiința de a privi lumea***. Cartea de față doreşte să ofere cititorului câteva puncte de reper pentru inițierea în *această* ştiință.

De aceea, sunt discutate pe rând *Percepția umană a Universului* (partea I-a), *Modelarea matematică a fenomenelor cereşti* (partea a II-a), felul în care s-a realizat trecerea de la aparență la realitate, adică *De la Cer la Univers* (partea a III-a), precum şi mijloacele cele mai importante prin care cunoştințele omului au trecut *Dincolo de limitele vederii umane* (partea a IV-a).

În sfârşit, partea a V-a este consacrată esențialului, dar mult neglijatului ***statut epistemologic al astronomiei***. Este evidențiat rolul de *ghid* al acestei ştiințe pentru cunoaşterea ştiințifică, între haosul percepțiilor primare şi lumea ordonată de inteligența umană. Cu alte cuvinte, rolul de ghid *Între Univers şi Cosmos*.

Autorul

CUPRINS GENERAL:

Restul capitolelor nu au fost redactate în contextul global al cărţii şi nu sunt incluse în ea; titlurile lor au fost incluse în acest cuprins pentru a oferi cititorului o imagine de ansamblu a concepţiei lucrării.

Cursanţii au primit, totuşi, un text tipărit anterior de autor, cu materialul corespunzător capitolului 3.3 (Prognoza mişcării corpurilor din sistemul solar); materialul părţii a IV-a a fost susţinut la curs de Dl. Zoltan Deak. Ideile iniţiale ale părţii a V-a se pot găsi într-o altă lucrare a autorului, LOGOMATEMATICA.

Partea a I-a

PERCEPȚIA UMANĂ A UNIVERSULUI

Motto:

Hypotheses non fingo!
(*Nu fac ipoteze!*)

Newton, *Optica*

CUPRINS:

Capitolul 1.1

PROPAGAREA ŞI PERCEPEREA ENERGIEI LUMINOASE

1.1.1 Surse de lumină

a. Surse primare şi secundare de lumină

Se numeşte SURSĂ DE LUMINĂ ("sursă luminoasă") orice obiect de la care lumina se propagă în spaţiul înconjurător.

Este în spiritul limbajului nostru curent ca un obiect care *produce* lumină să se numească *sursă de lumină* sau *sursă luminoasă*, în sensul de "izvor al luminii".

Obiectele care nu produc lumină acţionează în moduri diferite asupra luminii care ajunge la ele; unele sunt *transparente*, adică lasă să treacă lumina prin ele (de exemplu, geamurile de la ferestre); altele sunt *opace*, adică nu permit luminii să le traverseze. Gama interacţiunilor dintre corpuri şi lumină este însă mult mai variată şi nu ne propunem să o studiem acum.

Vom remarca, deocamdată, faptul că foarte multe corpuri *reflectă*, adică "întorc" lumina incidentă, trimiţând-o înapoi în spaţiu. De aceea ele pot fi considerate, la rândul lor, ca surse de lumină; pentru a distinge aceste corpuri de sursele "efective" de lumină, se extinde sfera iniţială, naturală, a conceptului de "sursă de lumină" la definiţia dată mai sus.

Vom împărţi sursele de lumină în *surse primare* (cele care *produc* lumină) şi *surse secundare* (cele care *nu* produc lumină, dar reflectă sau refractă[1] lumina incidentă).

Cea mai importantă sursă primară de lumină pentru viaţa noastră este, bineînţeles, Soarele; o sursă primară "clasică" este flacăra unei lumânări, iar surse primare mai curent utilizate azi sunt becurile (cu filament incandescent), tuburile cu neon etc.

Surse secundare de lumină întâlnim la tot pasul: un perete văruit, o oglindă, Luna ş.a.m.d.; de altfel, orice obiect pe care-l putem vedea este, dacă nu o sursă primară, măcar o sursă secundară de lumină.

b. Surse punctuale şi surse cu dimensiuni finite

Privirea omului este atrasă, instinctiv, de lumină, deci de sursele de lumină; totuşi, contemplarea directă a acestora poate produce, de multe ori, un efect nedorit

[1] corpuri care "refractă" lumina = care lasă să treacă lumina prin ele, dar o deviază.

asupra vederii noastre, ajungându-se uneori chiar la pierderea totală sau parţială a vederii. Se ştie că nu putem privi Soarele în plină zi decât dacă lumina sa este filtrată printr-un strat de nori; un bec privit direct, sau chiar o lumânare, ne poate produce o senzaţie neplăcută.

Lăsând pentru altădată problema generală a protecţiei vederii, să ne îndreptăm acum atenţia asupra posibilităţii de a privi *indirect* o sursă puternică, printr-un procedeu foarte simplu de realizare a unei *imagini* (mai puţin luminoase) a sursei; procedeul este ilustrat de figura 1.1.

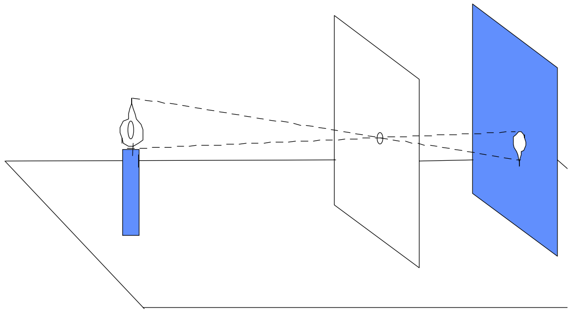


Figura 1. 1

Pentru a-l pune în aplicare, avem nevoie de un paravan mobil (un simplu carton) în care s-a creat - cu un ac - un mic orificiu; seara (sau ziua, dar cu storurile trase), aprindem o lumânare în cameră. Apropiind paravanul mobil de un perete (sau de *ecran* - un paravan fix), vom vedea pe acesta din urmă, clar, imaginea sursei de lumină (flacăra lumânării). Experienţa poate fi realizată folosind orice altă sursă, cu condiţia ca ecranul să fie umbrit de paravanul mobil, adică să fie ferit de lumina "directă" a sursei.

Mărimea imaginii depinde de poziţia paravanului găurit, mai precis de distanţele sursă-paravan şi paravan-ecran, dar despre acest aspect vom putea spune mai multe după ce vom formula o explicaţie a experienţei efectuate.

Explicaţia formării imaginilor prin procedeul din figura 1.1 face apel la câteva concepte (noţiuni) matematice elementare, constituind o primă *modelare matematică* a naturii înconjurătoare.

Mai întâi, vom considera că orificiul din paravanul mobil este atât de mic, încât poate fi *asimilat cu un punct*. Apoi, considerăm că sursa de lumină este un domeniu geometric, format dintr-o mulţime infinită de puncte luminoase; aceste puncte pot fi numite *surse punctuale*[2] de lumină, considerând că au dimensiuni infinit mici.

Asemănarea imaginii cu obiectul-sursă sugerează faptul că ea se formează prin *proiectarea* sursei pe ecran cu ajutorul unor drepte

[2] Termenul "punctual" se utilizează pentru a evita termenul "punctiform", care face o referire (fără obiect) la "forma punctului"; "punctual" are, la rândul său, o conotaţie temporală, dar aceasta se poate evita, de regulă, prin context.

care trec prin orificiul punctual al paravanului mobil; de aici rezultă, evident, că:

> *într-un mediu omogen, lumina se propagă, de la orice sursă punctuală spre orice punct din spațiu, în linie dreaptă; traiectoria luminii, între două puncte date, se mai numeşte "rază de lumină".*

Afirmația de mai sus duce, ca multe altele, la ideea centrală a *modelării matematice* şi este o primă exemplificare a cuvintelor lui Galileo Galilei:

> "*Universul ... este scris într-o limbă matematică şi caracterele sunt triunghiuri, cercuri şi alte figuri geometrice, mijloace fără de care ar fi cu neputință să înțelegem ceva.*"

Deşi nu are o realitate "fizică", noțiunea de *sursă punctuală* de lumină este o aproximație foarte utilă în multe situații din fizică şi astronomie, permițând introducerea şi utilizarea eficientă a unui aparat matematic.

Spre deosebire de sursele punctuale de lumină, noțiuni matematice despre care, pentru a fi "conectate" la realitatea fizică, se spune că "*au dimensiuni infinit mici*", sursele reale "*au dimensiuni finite*".

Revenind la problema mărimii imaginii de pe ecran, este evident că, dacă se aşează ecranul paralel cu axa sursei, triunghiurile cu vârful în orificiul paravanului şi având ca baze sursa, respectiv imaginea ei, sunt *triunghiuri asemenea*. Cititorul poate deduce singur relațiile dintre mărimile implicate în această asemănare, între care mărimea imaginii, a sursei, distanța sursă - paravan şi distanța paravan - ecran. Desigur, cititorul care are cunoştințe solide de geometrie elementară poate studia şi cazurile, mai complicate, în care ecranul nu este paralel cu axa sursei.

c. Diametrul unghiular al Soarelui

Luând Soarele ca sursă, putem forma imaginea sa utilizând un ecran mobil, care să poată fi orientat perpendicular pe direcția spre Soare (fig. 1.2). Orientarea celor două cartoane (paravan şi ecran) este relativ simplă, dacă urmărim ca ele să fie aproximativ paralele, iar umbra paravanului să acopere ecranul.

Dacă orientarea este bună, vom obține pe ecran un mic cerc, slab luminat, care este imaginea Soarelui; mărimea imaginii depinde, evident, de distanța dintre paravan şi ecran. Ne putem convinge, dacă mai este nevoie, *variind* această distanță, în limita permisă de lungimea brațelor; **la o distanță de aproximativ 1 m între ecran şi paravan, diametrul imaginii Soarelui este de aproximativ 1 cm**.

Desigur, imaginea obținută în acest fel nu este nici pe departe satisfăcătoare, dacă vrem să studiem suprafața Soarelui; totuşi, chiar atât de modestă cum este, ea devine utilă în cazul unei eclipse de Soare.

Într-adevăr, în această situație, procedeul rudimentar din figura 1.2 permite o urmărire sigură a desfăşurării întregii eclipse parțiale, urmărire lipsită de pericol pentru vederea noastră.

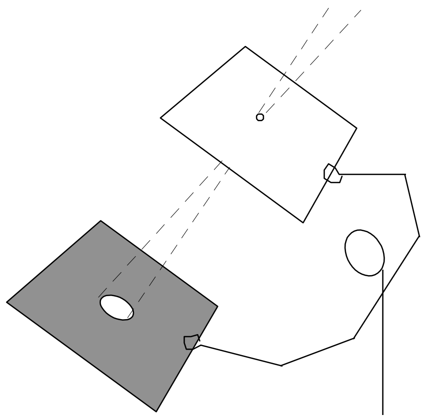


Figura 1. 2

Dar, chiar mai mult, obținerea imaginii Soarelui prin acest procedeu oferă posibilitatea realizării unei măsurători astronomice *efective*: este vorba de determinarea[3] diametrului unghiular al Soarelui.

> *Diametrul unghiular al Soarelui este unghiul maxim format de razele vizuale[4] tangente la suprafața Soarelui.*

---

[3] măsurarea *indirectă*.

[4] Razele vizuale sunt razele de lumină care ajung în ochiul observatorului; în cazul de față, dată fiind distanța mare până la Soare, putem considera că ochiul este plasat în chiar orificiul paravanului.

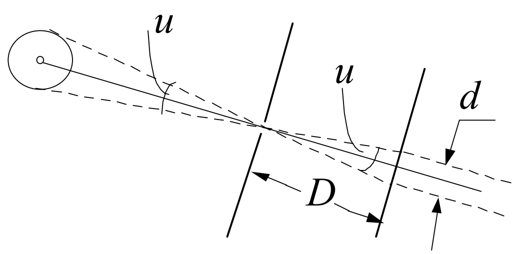


Figura 1. 3

Având în vedere drumul razelor de lumină prin orificiul paravanului, este evident (fig. 1.3) că cele două unghiuri cu vârful în orificiul paravanului sunt egale, fiind opuse la vârf. Ori, unul din cele două unghiuri este chiar diametrul unghiular al Soarelui!

Să considerăm triunghiul accesibil nouă, cu vârful în orificiul paravanului; el are ca bază segmentul d (diametrul imaginii Soarelui) şi ca înălţime un segment de lungime D (distanţa dintre paravane). Dacă direcţia spre centrul Soarelui este perpendiculară pe cele două paravane, este evident că triunghiul considerat este *isoscel* (bisectoarea unghiului din vârf este şi înălţime); în acest caz, triunghiul este *complet determinat* de segmentele d şi D. În consecinţă, măsurarea celor două segmente *determină* toate elementele triunghiului, deci şi unghiul u.

Dar, unghiul u fiind foarte mic, încercarea de a-l măsura direct - pe o figură realizată la scară, pe hârtie - cu un raportor, nu poate duce decât la rezultate eronate în mod grosolan.

d. Relaţii exacte şi aproximaţii

Este mai indicat să se determine măsura unghiului u prin calcul; acest lucru *trebuie* să fie posibil, deoarece triunghiul care-l cuprinde este bine (complet) determinat.

Tocmai pentru a rezolva astfel de cazuri a fost creată ramura matematicii numită *trigonometrie*; ea stabileşte, printre altele, relaţiile dintre lungimile laturilor unui triunghi şi măsurile unghiurilor sale. Pentru a se face mai funcţionale aceste relaţii, au fost create aşa-numitele *funcţii trigonometrice* care, după cum vom arăta în alt paragraf (1.1.3 c), ar fi fost mai potrivit să se numească funcţii *goniometrice*, deoarece sunt asociate fiecărui unghi.

Utilizând una dintre aceste funcții (tangenta) și funcția inversă asociată ei (arctangenta), deducem imediat, din triunghiul considerat:

$$\operatorname{tg}\frac{u}{2}=\frac{d/2}{D} \quad \Rightarrow \quad u=2\cdot \operatorname{arctg}\frac{d/2}{D} \quad . \tag{1.1}$$

Deși relația (1.1) ne oferă soluția exactă[5] a problemei determinării diametrului unghiular, este momentul să luăm în considerare și o altă variantă de calcul, mai simplă - aproximativă, e adevărat! - care poate fi aplicată datorită unei particularități a situației noastre.

De altfel, în modelarea matematică a fenomenelor naturale, aproximările de diferite naturi sunt frecvente; chiar *asimilarea* unor obiecte reale cu unele obiecte matematice comportă, din start, un grad de aproximație. Acest aspect a fost subliniat de noi în cursul descrierii formării imaginilor surselor luminoase.

Vom aborda acum un alt gen de aproximații, care apare mai târziu, pe parcursul tratării matematice a modelelor create pentru fenomenele naturale. Aceste aproximații, deși nu sunt întotdeauna necesare din punct de vedere matematic, sunt sugerate de contextul concret al fenomenelor studiate și pot simplifica - de multe ori radical - aparatul matematic utilizat.

În cazul de față, diametrele unghiulare ale aștrilor sunt (unghiuri) deosebit de mici; chiar Soarele și Luna au diametre unghiulare numai de ordinul unei jumătăți de grad (30').

În astfel de situații, putem stabili relații mai simple între unghiuri și lungimi, pe baza unei aproximații la îndemână, fără a face apel la funcțiile trigonometrice.

Pentru aceasta, să considerăm un cerc de rază D (fig. 1.4), în care să înscriem diferite poligoane regulate;

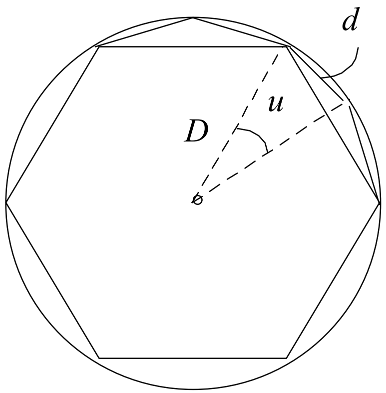


Figura 1. 4

[5] "Exactă" în sens matematic, în ceea ce privește calculul efectuat; precizia determinării este, însă, dată, în mod esențial, de precizia cu care se efectuează măsurarea "datelor de intrare" în calcul, deci a lungimilor d și D.

evident, exprimarea laturii în funcție de rază trebuie să se facă prin intermediul funcțiilor trigonometrice ale unghiului la centru corespunzător laturii respective.

Să ne gândim însă, acum, la un poligon regulat astfel construit încât fiecare latură să se "vadă" din centru sub un unghi de ... 1"!

Acest poligon are 360(°) • 60(') • 60(") = 1 296 000 laturi; evident, orice încercare de desenare a lui nu va putea decât să reproducă cercul inițial, cu care, *practic*, poligonul nostru coincide!

Dar lungimea cercului este $l_c = 2 \cdot \pi \cdot D$; rezultă că la 1" unghi la centru corespunde, pe cerc, o lungime de

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot D}{1296000} \cong \frac{1}{206265} \cdot D \quad .$$

Câtă vreme unghiurile sunt foarte mici, lungimile coardelor cercului pot fi aproximate prin lungimile arcelor corespunzătoare, care *sunt proporționale cu unghiurile*; prin urmare, regula de trei, simplă, arată că la un unghi (la centru) de u" va corespunde o lungime

$$d \cong \frac{u''}{206265} \cdot D \quad . \tag{1.2}$$

Relația (1.2) este aplicabilă, dacă u este mic, în orice situație în care lungimea d este privită normal[6] de la distanța D.

În consecință, pentru calcularea diametrelor unghiulare ale Soarelui și Lunii, prin măsurarea segmentelor d și D (fig. 1.3), putem folosi relația aproximativă:

$$u'' \cong 206\,265 \cdot \frac{d}{D} \quad . \tag{1.3}$$

Relațiile (1.2), respectiv (1.3), aplicabile doar pentru unghiuri mici, au avantajul că nu necesită utilizarea funcțiilor trigonometrice ale unghiurilor respective; acest avantaj, în condițiile de azi - caracterizate prin utilizarea curentă a calculatoarelor electronice - nu mai este esențial. Totuși, astfel de relații - aproximative, dar suficient de precise - au și un alt avantaj: acela de a face mai evidente legăturile dintre diferitele mărimi care intervin în ele, legături care par uneori "nebuloase" datorită aparatului matematic.

[6] "Normal": direcția privirii fiind perpendiculară pe direcția segmentului *d*.

e. Erori absolute şi erori relative

Cititorul care doreşte să efectueze practic acestă determinare va trebui să măsoare cu cea mai mare acuratețe lungimile d şi D; ori, în condițiile sugerate de figura 1.2, acest lucru este greu de realizat, chiar dacă măsurătorile sunt efectuate de o echipă.

Este bine ca ansamblul celor două paravane să fie în prealabil *rigidizat* printr-o structură din lemn sau din metal; sau, şi mai bine, se poate construi un *tub solar* dintr-un cilindru de câțiva centimetri diametru, din carton sau material plastic.

Unul din capetele tubului se închide cu un carton perforat în centru, iar pe celălalt capăt se lipeşte, cu bandă adezivă, o bucată de hârtie de calc, bine întinsă şi aşezată perpendicular pe axul tubului.

În acest caz, D este chiar lungimea tubului solar, iar singura mărime care rămâne de măsurat este d; orientarea tubului pe direcția spre Soare se face urmărind ca umbra lăsată de tub pe sol să fie minimă. O echipă de doi observatori va putea asigura, pentru câteva secunde, atât fixitatea necesară a tubului solar cât şi măsurarea cât mai atentă a lui d.

Deşi "solar", tubul confecționat poate fi folosit şi pentru determinarea diametrului unghiular al Lunii. Recomandăm cititorului şi această determinare!

O altă chestiune este aceea de a alege cea mai potrivită mărime pentru "tubul solar" sau pentru structura rigidă echivalentă.

Prima tentație este de a alege o lungime minimă a acestuia, pentru a reduce la minim dificultățile de construcție şi de manevrare; dar, dacă această lungime este mică, se micşorează şi diametrul imaginii Soarelui!

Ori, măsurând acest diametru cu o riglă, eroarea ("*absolută*") probabilă este cam 0,5 mm; dacă această eroare se face asupra unui diametru de 1 cm, ea reprezintă 5 % din mărimea măsurată, iar dacă se face asupra unui diametru de 2 mm, ea reprezintă 40 % ! Eroarea absolută este un parametru caracteristic pentru instrumentul de măsurare utilizat, în timp ce eroarea "*relativă*" (5 %, respectiv 40 % în cele două cazuri menționate) depinde de circumstanțele în care se realizează măsurătoarea.

Cu un instrument dat, vom face mereu - aproximativ - aceeaşi eroare absolută; totuşi, eroarea relativă poate fi redusă substanțial, dacă ne încadrăm în circumstanțe adecvate acestui scop.

Astfel, în cazul nostru, pentru a reduce cât mai mult eroarea relativă de măsurare, este necesar să avem o imagine cât mai mare a Soarelui, deci să luăm o lungime cât mai mare pentru tubul solar. Totuşi, nu trebuie să cădem în cealaltă extremă: dacă această lungime este prea mare, imaginea Soarelui - mai mare, e adevărat - va fi prea puţin luminoasă şi vom avea probleme serioase încercând să-i vedem marginile!

f. Diametrul liniar al aştrilor; alte aplicaţii

Diametrul unghiular al unui astru depinde, în mod esenţial, de distanţa dintre observator şi astrul respectiv; acest diametru nu oferă, deci, o informaţie substanţială despre mărimea astrului observat.

Totuşi, dacă distanţa până la astru a putut fi determinată printr-un procedeu oarecare, cunoaşterea diametrului unghiular îşi dovedeşte din plin utilitatea. Fie, în figura 1.5, *u*"/2 raza unghiulară a astrului, *d* distanţa astru-observator, iar *r* raza (liniară) a astrului. Relaţia (1.2), aplicată în acest caz, capătă forma:

$$\frac{u''}{2} \cong 206\,265 \cdot \frac{r}{d} \quad , \qquad (1.4)$$

de unde rezultă imediat raza astrului observat:

$$r \cong \frac{u''/2}{206\,265} \cdot d \,. \qquad (1.5)$$

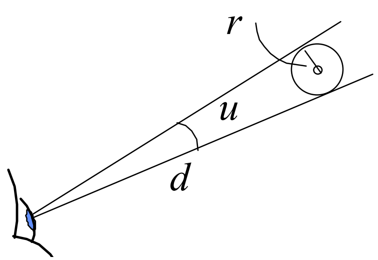


Figura 1. 5

Analog, tot din (1.4) se poate exprima şi distanţa astru-observator:

$$d \cong \frac{206\,265}{u''/2} \cdot r \qquad (1.6)$$

Cititorul poate deduce singur şi relaţiile exacte corespunzătoare.

Aflarea diametrului liniar al aştrilor - pe baza relaţiei (1.5) - evidenţiază, de pe acum, importanţa deosebită pe care o are determinarea distanţelor cosmice. Din păcate, această problemă este foarte greu de rezolvat şi, de aceea, formarea unei imagini sigure despre Univers a durat deosebit de mult, chiar la scara istoriei.

Totuşi, chiar şi numai determinarea diametrului unghiular al unui astru permite unele concluzii calitative. Astfel, dacă se efectuează determinări ale diametrului unghiular pe o perioadă mai lungă (de ex., un an), *se poate urmări dacă el rămâne sau nu constant*. În caz afirmativ, putem trage concluzia că distanța astru-observator se păstrează constantă; în caz contrar, evident, această distanță suferă o variație care produce variația observată a diametrului unghiular.

Astfel, în cazul diametrelor unghiulare ale Lunii şi Soarelui, se constată că fiecare din cele două diametre este constant, cel puțin în aproximația mijloacelor de măsurare utilizate.

Atunci, din relația (1.6) rezultă imediat că - aproximativ - distanțele Pământ-Soare şi Pământ-Lună sunt constante. De aici putem deduce că, în mişcarea acestor trei corpuri,

1. - Luna nu se poate deplasa în jurul Soarelui, deoarece distanța Pământ- Lună nu ar putea rămâne constantă *simultan* cu distanța Pământ-Soare.
2. - Analog, Soarele nu se poate deplasa în jurul Lunii.

În consecință, mişcările "permise" celor trei corpuri, pe traiectorii aproximativ circulare, sunt (fig. 1.5'):

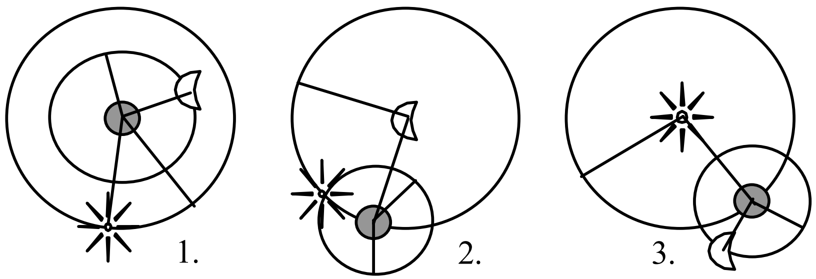


Figura 1. 5': Mişcările care pot păstra constante simultan distanțele Pământ-Soare şi Pământ-Lună

1. - Atât Soarele, cât şi Luna, în jurul Pământului;
2. - Soarele în jurul Pământului, iar acesta în jurul Lunii;
3. - Luna în jurul Pământului, iar acesta în jurul Soarelui.

Bineînţeles, pentru a decide care din cele trei combinaţii de mişcări este "reală", mai avem nevoie de alte informaţii, pe lângă cele oferite de constanţa diametrelor unghiulare ale Soarelui şi Lunii.

Totuşi, iată că, măsurători, care - la prima vedere - nu par promiţătoare, pot duce la rezultate substanţiale dacă sunt efectuate cu acurateţe şi cu perseverenţă. Astronomia ne oferă nenumărate exemple de acest fel, istoria acestei ştiinţe fiind şi o istorie a perfecţionării abilităţilor practice ale omului.

1.1.2 Constanta solară

a. Corpul negru

Sursele secundare de lumină nu reflectă *toată* lumina incidentă ci numai o parte a acesteia şi, de regulă, mai ales o anumită componentă (culoare); toate corpurile *absorb* o parte, mai mare sau mai mică, a luminii incidente.

Astfel, de exemplu, corpurile *albe* reflectă puternic toate componentele luminii, în timp ce corpurile *negre* absorb puternic toate aceste componente. De fapt, "albul" şi "negrul" nici nu sunt *culori* propriu-zise (componente ale luminii), ci sunt nume ale proprietăţilor amintite. Despre componentele luminii vom discuta în altă parte; aici vom reţine doar faptul că un corp de culoare neagră absoarbe puternic toate componentele luminii.

Se numeşte CORP NEGRU un corp care absoarbe, în întregime, *toate* componentele luminii.

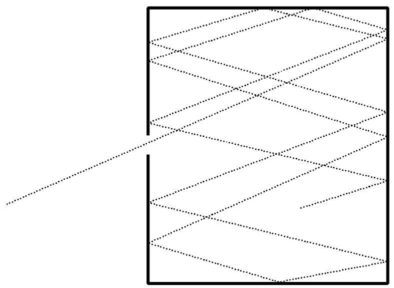


Figura 1. 6

Evident, definit în acest fel, *corpul negru* este un corp *ideal*, dar se pot realiza diferite corpuri reale ale căror proprietăţi să se apropie sensibil de ale acestuia. Un prim exemplu, uşor de realizat, îl constituie orice corp acoperit cu vopseaua numită "negru de fum".

Viaţa cotidiană ne oferă însă o sugestie mai interesantă: este vorba - surprinzător, poate - de *orice cameră obişnuită*, de locuit! Într-adevăr, *privite din exterior*, în plină zi, *toate* camerele de locuit par *întunecoase*, chiar dacă, intrând într-o astfel de cameră, constatăm că ea este, de fapt, luminoasă!

Explicația este relativ simplă (fig. 1.6): lumina intrată în cameră este reflectată de pereți, lumina reflectată de pereți este din nou reflectată de alți pereți ş.a.m.d., doar o mică parte din lumină "reuşind" să iasă din cameră. Fiecare reflectare este însoțită şi de o absorbție parțială, deci o asemenea încăpere se apropie, într-adevăr, de ideea de *corp negru*.

Pentru ca apropierea să fie şi mai pronunțată, nu avem decât să vopsim cu negru de fum pereții interiori şi să reducem fereastra camerei; evident, o astfel de cameră nu este "de locuit", dar modelul la scară redusă poate constitui un exemplu eficient de realizare a exigențelor corpului negru.

Chiar şi ochiul omenesc acționează, în bună măsură, ca un corp negru de acest tip (fig. 1.7). Globul ocular are, în partea lui frontală, o mică "lentilă" (*cristalinul*) care formează pe partea foto-sensibilă din spate (numită *retină*) imaginea obiectelor privite. În fața cristalinului se află o "diafragmă" colorată (*irisul*), prin a cărei deschidere centrală (numită *pupilă*) lumina este lăsată să pătrundă în ochi.[7]

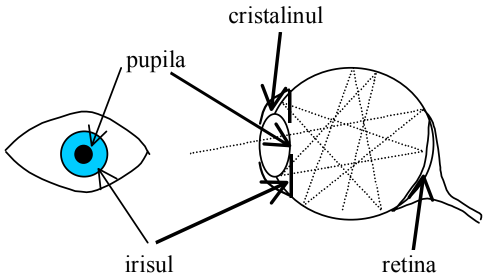


Figura 1. 7

La fel ca în cazul incintei unui corp negru, lumina intrată în ochi prin pupilă nu mai poate ieşi decât în foarte mică măsură; efectul este că "vedem" pupila ochiului omenesc ca pe o mică *pată neagră* aşezată în centrul irisului!

Diametrul pupilei este variabil, asigurând - prin micşorarea sa reflexă - protecția retinei împotriva luminii prea puternice şi contribuind - prin mărirea sa, tot reflexă - la creşterea sensibilității văzului în întuneric; la pisică, de exemplu, pupila este variabilă în limite mai largi decât la om, asigurând o foarte bună vedere de noapte.

Să reținem, în încheiere, **diametrul mediu al pupilei: 5 mm**.

---

[7] O reprezentare mai completă (şi mai corectă) poate fi găsită în manualele de anatomie.

b. Energia luminoasă; alte forme de energie

Pentru *capacitatea* unui corp sau a unui sistem de *a acţiona asupra altui corp sau sistem* se utilizează denumirea generică de "*energie*". Evident, *lumina posedă o energie*, deoarece ea *exercită o acţiune* asupra corpurilor pe care "cade"; ochiul este sensibil la această acţiune, dar şi alte corpuri o evidenţiază (pielea omului, apele stătătoare etc.).

Modalităţile concrete de "acţiune" dintre corpuri sau sisteme sunt foarte variate; se spune că energia este de mai multe "feluri" sau că ea are diferite "forme"; energia care produce schimbări ale formei sau mişcării unor corpuri este numită *energie mecanică*, energia care produce schimbarea temperaturii unui corp este numită *energie termică* sau calorică, energia care este radiată în spaţiu se mai numeşte *energie radiantă* etc.

De regulă, în cadrul interacţiunii dintre corpuri sau sisteme are loc un "transfer" de energie de la un corp (sistem) la altul; în cadrul acestui transfer, energia se poate transforma dintr-o formă a ei în alta. Vorbind despre transformarea unei forme de energie în alta, trebuie să menţionăm aici *principiul*[8] conservării energiei:

> Nici o cantitate de energie nu poate apărea din nimic şi nici o cantitate de energie nu poate dispărea fără urmă; diferitele forme de energie se pot transforma unele în altele. ("*Nimic nu se pierde, nimic nu se câştigă, totul se transformă*").

Varietatea formelor de energie a dus la definirea mai multor unităţi de măsură pentru energie; pentru fiecare formă de energie a părut să fie mai potrivită o anumită unitate de măsură, legată de efectul cel mai direct măsurabil al energiei respective. De exemplu, pentru energia calorică (termică) s-a definit o unitate de măsură legată de specificul fenomenelor termice:

> CALORIA este, prin definiţie, *cantitatea de energie care produce creşterea temperaturii unui gram de apă cu un grad Celsius*.

Definiţia de mai sus sugerează, de fapt, că energia termică absorbită sau cedată de o cantitate de apă este *proporţională* cu masa apei, precum şi cu variaţia (creşterea sau scăderea) temperaturii. Într-adevăr, experienţele de laborator arată că aceste proporţionalităţi sunt reale, în limite de precizie satisfăcătoare.

Dacă notăm cu m masa apei şi cu Δt variaţia de temperatură - care poate fi pozitivă (la încălzire) sau negativă (la răcire) - cantitatea de energie absorbită (sau cedată) de masa de apă, exprimată în calorii, va fi:

$$\Delta E = m \cdot \Delta t \tag{1.7}$$

Principiul conservării energiei, aplicat la diversele cazuri concrete de transformare a energiei dintr-o formă în alta, ne dă posibilitatea de a stabili relaţiile dintre diversele unităţi de măsură specifice. Pe baza acestor relaţii, *toate* cantităţile de energie pot fi exprimate într-o aceeaşi unitate - aleasă prin convenţie - pentru a putea compara direct energiile respective.

[8] *Principiu* = adevăr fundamental care trebuie admis <u>în orice situaţie</u>.

Am reamintit aici definiția caloriei deoarece dorim să ne ocupăm în continuare de cea mai cunoscută sursă primară de lumină, Soarele; după cum ştim încă din copilărie, "Soarele ne dă *lumină şi căldură*". De fapt, energia termică acumulată de corpurile expuse la Soare rezultă tocmai din *transformarea în căldură a energiei radiante* provenite de la Soare.

Aplicând în acest caz principiul conservării energiei putem măsura - indirect - energia adusă pe Pământ de lumina solară; pentru aceasta, vom măsura cantitatea de energie termică acumulată de un corp negru prin expunerea sa la Soare.

c. Despre măsurători şi funcții

Termometrul este un instrument care ne permite să asociem fiecărei stări termice un *număr* numit *temperatura* corpului. Măsurarea temperaturii este, deci, ca orice altă măsurătoare, un *procedeu de asociere* a unui număr fiecărei stări termice; mulțimii stărilor posibile îi corespunde o mulțime de numere (temperaturi), obținute prin procedeul de "măsurare" a temperaturii.

Dar *asocierea* - printr-un procedeu bine definit - la fiecare element dintr-o mulțime, a câte unui element din altă mulțime (nu neapărat de *numere*), este tocmai ceea ce se numeşte o "*funcție*"; vom reveni asupra acestei definiții în partea a V-a. Fiecare *operație de măsurare* defineşte o *funcție cu valori numerice*; domeniul de definiție este o mulțime oarecare, dar "rezultatul" măsurării este un *număr*, deci domeniul valorilor este o mulțime de numere. Orice caracteristică a unui corp sau sistem, *care poate fi măsurată*, poartă şi numele generic de "*mărime*".

Relația (1.7), poate fi privită ca fiind *relația de definiție* a unei funcții:

$$\Delta E(\Delta t) = m \cdot \Delta t \quad .$$

Un alt exemplu de funcție uzuală: *aria* sferei este *funcție* de *raza* ei:

$$S(r) = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \quad .$$

Acestea fac parte din familia funcțiilor "polinomiale", care sunt exprimate cu ajutorul celor mai simple expresii algebrice, polinoamele de diferite grade. Ultima este o funcție "de gradul al doilea", iar prima este o funcție "de gradul întâi"; ea se mai numeşte şi "liniară", deoarece graficul ei este o linie dreaptă.

Dar astronomia a definit sau a contribuit la definirea multor altor funcții de largă utilitate. Astfel, am amintit şi vom reveni asupra funcțiilor "trigonometrice", care asociază fiecărui unghi un număr real; introducerea şi cunoaşterea proprietăților acestora se datorează în primul rând astronomiei, care a fost obligată să utilizeze unghiuri, în lipsă de altceva mai consistent, cum ar fi distanțele. Apoi, chiar în acest capitol, vom avea ocazia să vedem cum o altă funcție importantă (funcția logaritmică) este introdusă şi utilizată de astronomie. Şi acestea sunt doar câteva exemple!

d. Constanta solară

CONSTANTA SOLARĂ este, prin definiție, cantitatea de energie pe care o primeşte într-un minut, de la Soare, o suprafață plană de 1 cm^2 aşezată la distanța medie Soare - Pământ, perpendicular pe direcția razelor solare.

Problema determinării constantei solare prin observații (măsurători) face obiectul unui capitol numit *actinometrie*; instrumentele utilizate în acest scop se numesc *actinometre*.

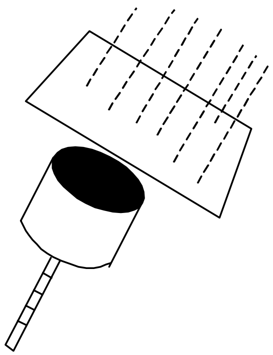


Figura 1. 8

Cel mai simplu astfel de instrument este *actinometrul lui Pouillet*; el constă (fig. 1.8) dintr-o cutie cilindrică etanşă de tablă, având una din bazele exterioare vopsită cu negru de fum. În interiorul cutiei se pune apă distilată şi rezervorul unui termometru cu mercur, al cărui tub iese din cutie prin cea de a doua bază.

La începutul determinării, instrumentul este protejat un timp de razele solare cu ajutorul unui paravan (ecran) opac; după stabilizarea temperaturii, se citeşte temperatura t_0 (care va fi aceea a aerului înconjurător). Se înlătură apoi ecranul, se orientează baza neagră perpendicular pe direcția spre Soare (reducând la minimum aria umbrei lăsate de actinometru) şi se lasă ca razele solare să ilumineze fața înnegrită. După τ minute, timp în care temperatura apei a crescut vizibil, se citeşte această temperatură, t_1.

Dacă notăm cu A aria bazei înnegrite (exprimată în cm^2), cu M masa apei din cutie (exprimată în grame) şi cu q constanta solară, putem scrie o relație calorimetrică simplă, care exprimă faptul că energia absorbită de actinometru prin baza sa în intervalul dat de timp (τ) este egală cu variația energiei calorice a masei de apă din aparat:

$$A \cdot \tau \cdot q = M \cdot (t_1 - t_0) \quad ; \qquad (1.8)$$

din (1.8) se poate obține imediat constanta solară q:

$$q = \frac{M \cdot (t_1 - t_0)}{A \cdot \tau} \quad . \qquad (1.9)$$

Evident, pentru a obține o determinare foarte precisă, calculul constantei solare va fi mai complicat, deoarece trebuie să se țină seama de pierderea de căldură din actinometru, precum şi de absorbția de către actinometru a radiației din atmosferă. De asemenea, este evident că măsurătorile ar trebui să fie efectuate la o înălțime cât mai mare, eventual în afara atmosferei.

Cele mai sigure determinări ale constantei solare au dat valoarea:

$$q = 1{,}97 \pm 0{,}01\, calorii/cm^2/min \,, \qquad (1.10)$$

adică aproximativ **două calorii pe cm² şi pe minut**.

e. Consecințe ale cunoaşterii constantei solare

Să notăm cu a distanța de la Soare la Pământ; dacă cunoaştem constanta solară q, atunci putem calcula imediat câtă energie radiantă ajunge într-un minut *peste tot* în spațiu, la distanța a de la Soare.

Deoarece punctele la care ne referim se află pe o sferă de rază a, cu centrul în centrul Soarelui, energia care traversează *întreaga* sferă de rază a într-un minut este:

$$E = 4 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot q \quad . \qquad (1.11)$$

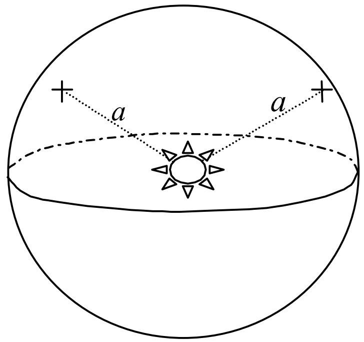


Figura 1. 9

Toată această energie îşi află obârşia în Soare; ea reprezintă, de fapt, *cantitatea de energie emisă în spațiu de Soare într-un minut*. Dar, pentru a cunoaşte efectiv valoarea acestei energii, trebuie să cunoaştem valoarea distanței a de la Soare la Pământ.

Iată, deci, că întâlnim o situație obişnuită în procesul de *modelare matematică a fenomenelor naturale*: nu putem culege "roadele" modelului până nu determinăm un parametru introdus pe parcursul modelării. Ca şi în cazul de față, determinarea acestuia poate fi destul de complicată; noi vom amâna rezolvarea problemei - aşa cum s-a întâmplat şi în istoria astronomiei - până vom dispune de mai multe elemente, dar, în acelaşi timp, vom extinde aria consideraţiilor lipsite de concretizări valorice imediate.

Energia E este produsă de Soare într-un minut şi este emisă în spaţiu de el, mai precis de suprafaţa sa, care este tot o sferă, de rază R_S [9]; aria suprafeţei solare este $S_S = 4\pi R_S^2$. În consecinţă, *cantitatea de energie radiată în unitatea de timp de unitatea de suprafaţă a Soarelui* este dată de relaţia:

$$E_u = \frac{E}{S_s} = \frac{E}{4\cdot\pi\cdot R_s^2} = \frac{4\cdot\pi\cdot a^2\cdot q}{4\cdot\pi\cdot {R_s}^2} = q\cdot\frac{a^2}{{R_s}^2} = q\cdot\left(\frac{a}{R_s}\right)^2 . \qquad (1.12)$$

Dar *legea lui Stefan-Boltzmann* (pe care o putem găsi în manualele de fizică) arată că energia totală radiată în unitatea de timp de unitatea de suprafaţă a unui corp negru este funcţie de temperatura efectivă (absolută) a acestuia:

$$E_u = \sigma\cdot T^4 \text{, unde } \sigma = 5{,}6698\cdot 10^{-5}\ \text{erg/cm}^2\text{/s}.$$

Prin urmare, cunoaşterea acestei mărimi (E_u) ar permite ca, uzând de legea lui Stefan-Boltzmann, să evaluăm *temperatura suprafeţei solare*, parametru de stare care ar constitui, evident, un punct de pornire pentru orice încercare de a cunoaşte fizica Soarelui.

Din păcate, ca şi în cazul relaţiei (1.11), în (1.12) nu cunoaştem decât constanta solară!

f. Şi totuşi, ... se poate !

Între relaţiile (1.11) şi (1.12) există o deosebire importantă; se poate remarca faptul că în relaţia (1.12) apare, de fapt, pătratul *raportului* dintre distanţa Soare-Pământ şi raza Soarelui. Ori, notate acolo cu d şi r, cele două mărimi apăreau şi în relaţia (1.4), care se referea la diametrul unghiular!

---

[9] Pentru mărimile relative la Soare, se utilizează de multe ori semnul "⊙" - numit "simbolul Soarelui" - ataşat, ca indice, mărimilor respective (ex.: $R_{\odot}$ este notaţia pentru raza Soarelui).

În consecință, raportul a/R_s rezultă imediat din (1.4), exprimat în funcție de semi-diametrul unghiular al Soarelui:

$$\frac{a}{R_s} = \frac{206\,265}{u''/2} \quad . \tag{1.13}$$

Prin urmare, pentru *cantitatea de energie emisă de unitatea de suprafață a Soarelui în unitatea de timp* găsim:

$$E_u = q\left(\frac{206\,265}{u_s''/2}\right)^2 \quad , \tag{1.14}$$

de unde derivă un rezultat substanțial: **determinarea temperaturii suprafeței Soarelui este posibilă pe baza a două măsurători elementare: a constantei solare şi a diametrului unghiular al Soarelui.**

Probleme

Problema 1.1.1. Luând q = 2 cal/cm^2/min şi a = 150.000.000 km, calculați energia emisă de Soare în fiecare secundă; exprimați-o în calorii, precum şi în celelalte unități cunoscute pentru energie.

Problema 1.1.2. Utilizând valoarea de 30' pentru diametrul unghiular al Soarelui şi luând q = 2 cal/cm^2/min, calculați temperatura superficială a Soarelui, pe baza legii Stefan-Boltzmann.

Problema 1.1.3. Utilizând valoarea de 30' pentru diametrul unghiular al Soarelui şi luând q = 1,97 cal/cm^2/min, calculați temperatura superficială a Soarelui, pe baza legii Stefan-Boltzmann. Comparați cele două rezultate şi evaluați eroarea relativă a rezultatului problemei precedente!

1.1.3 Propagarea energiei luminoase

În subcapitolul precedent s-au utilizat câteva idei din sfera bunului-simț comun, privitoare la propagarea energiei luminoase; vom întreprinde în cele ce urmează o scurtă trecere în revistă a altor idei de acelaşi gen, din dorința de a le exploata cât mai eficient, dar şi din dorința de a împiedica transformarea lor în "idei preconcepute".

a. Front luminos, iluminare

În legătură cu *modul de propagare* a luminii de la o sursă luminoasă în spațiul din jurul acesteia, experiența noastră cotidiană cu diferite surse primare de lumină (becuri, lumânări, chibrituri etc.) ne arată că lumina plecată de la o sursă primară de lumină se răspândește **în toate direcțiile**.

Este adevărat că noi folosim și "surse" care trimit lumina numai într-o direcție (lanterne, faruri, reflectoare, laseri etc.), dar acestea nu sunt surse luminoase *primare* ci dispozitive care includ surse de lumină în vecinătatea cărora se află corpuri *reflectante* (oglinzi) care "întorc" lumina sursei din cele mai multe direcții într-o direcție privilegiată (fig. 1.10). Afirmația de mai jos este, deci, conformă cu constatările experimentale:

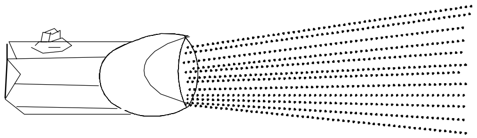


Figura 1. 10

orice sursă luminoasă primară emite lumină în toate direcțiile.

În fiecare moment, din sursă "pleacă" o anumită "cantitate de energie luminoasă"; această cantitate de energie luminoasă se va "împrăștia" *în toate direcțiile*, deci se va repartiza pe o suprafață *din ce în ce mai mare*.

În consecință, cantitatea de energie luminoasă de pe fiecare unitate de suprafață va fi din ce în ce mai mică, iar ochiul (plasat la distanțe tot mai mari) va primi din ce în ce mai puțină lumină de la sursa respectivă. Să nu uităm că lumina pătrunde în ochiul nostru mereu prin aceeași suprafață, "fereastra" ochiului fiind *pupila*.

Aceasta este explicația sumară a faptului că o sursă de lumină, privită din apropiere, impresionează mult mai puternic ochiul decât atunci când este privită de la o distanță mare.

Încercând să formulăm mai riguros cele de mai sus, vom considera - pentru simplitate - că sursa este *punctuală*, adică se reduce la un punct **S** (fig. 1.11); mai presupunem că lumina se propagă în toate direcțiile *cu aceeași viteză*, notată cu *c* [10].

Să considerăm, deci, cantitatea de energie luminoasă care părăsește "la un moment dat" sursa; după un timp oarecare, lumina a parcurs în toate direcțiile aceeași

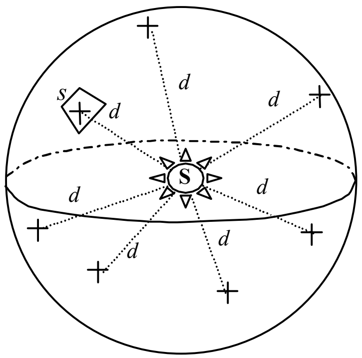


Figura 1. 11

---
[10] Nu putem evalua încă această viteză, dar acum nu ne preocupă rapiditatea cu care se desfășoară fenomenele luminoase.

distanță, deoarece se deplasează cu aceeași viteză. Deci, lumina plecată la un moment dat din sursă se va "distribui" pe suprafața unei sfere cu centrul în sursă; raza sferei crește, evident, proporțional cu timpul, factorul de proporționalitate fiind tocmai viteza luminii c. Reținem că:

> *Lumina care părăsește la un moment dat o sursă punctuală se repartizează pe o sferă a cărei rază crește proporțional cu timpul*; această suprafață sferică se numește *front de lumină*.

Să considerăm, acum, că ne aflăm la distanța d de sursă; ne aflăm, deci, *pe frontul de lumină cu raza* d. Dacă în unitatea de timp sursa emite o cantitate E_0 de energie, această energie va traversa, tot în unitatea de timp, fiecare front de lumină. Aria acestui front de lumină - a acestei sfere! - este $A = 4\pi d^2$, deci *unitatea de suprafață* este traversată, în fiecare unitate de timp, de cantitatea de energie:

$$\Phi = \frac{E_0}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \quad . \tag{1.15}$$

În consecință, o suprafață oarecare s de pe sferă, deci aflată la distanța d de sursă, va primi de la aceasta, în fiecare unitate de timp, cantitatea de energie:

$$I = \Phi \cdot s = \frac{E_0 \cdot s}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \tag{1.16}$$

E_0 se mai numește *intensitatea sursei luminoase*, Φ se mai numește *flux luminos*, iar I - *iluminarea suprafeței* s. Putem îngloba într-o singură mărime toți parametrii care nu depind de distanță sau de suprafața dată:

$$k = \frac{E_0}{4 \cdot \pi} \quad ; \tag{1.17}$$

cu notația (1.17), relația (1.16) devine:

$$I = k \frac{s}{d^2} \quad . \tag{1.18}$$

Relația (1.18) este numită "*legea iluminărilor*"; ea stabilește legătura dintre iluminarea unei suprafețe și distanța sursă-suprafață iluminată:

> *Iluminarea produsă de o sursă punctiformă este invers proporțională cu pătratul distanței dintre sursă și suprafața luminată de ea.*

Legea iluminărilor ne arată că, dacă ne depărtăm de o sursă luminoasă, iluminarea produsă de ea scade *foarte rapid*.

Chiar și în situația în care nu cunoaștem intensitatea sursei luminoase, legea iluminărilor este deosebit de utilă deoarece ea permite compararea iluminărilor a două suprafețe aflate la distanțe diferite de sursă. Fie, de exemplu, o sursă care, la distanța d_1, produce iluminarea I_1 pe o arie s; la distanța d_2, aceeași sursă (având aceeași "constantă" k) produce iluminarea I_2 pe o suprafață de aceeași arie s. Raportul celor două iluminări va fi:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{k \cdot s}{d_2^2} \cdot \frac{d_1^2}{k \cdot s} = \frac{d_1^2}{d_2^2} \quad , \tag{1.19}$$

relație care poate exprima, ea însăşi, legea iluminărilor.

Să considerăm, de exemplu, că am studia Soarele de pe planeta Pluto, aflată de aproximativ *40 de ori mai departe* de Soare decât Pământul; evident, vom avea la dispoziție de *1600 de ori (40^2!) mai puțină lumină* decât pe Pământ.

b. Iluminarea unei suprafețe plane orientate în mod arbitrar

În cele de mai sus am discutat despre iluminarea "unității de suprafață" şi despre iluminarea unei suprafețe care - implicit - era considerată *pe un front de lumină*, deci pe o *sferă cu centrul în sursă*. Dar noi avem de a face, de multe ori, cu suprafețe plane; or, o suprafață plană nu poate fi făcută să coincidă cu o porțiune a unei sfere. Studiul general al iluminării unei suprafețe plane face necesară recurgerea la calculul integral, eventual pe cale numerică.

Totuşi, în astronomie avem de a face în mod obişnuit cu o situație în care lucrurile se simplifică "de la sine": suprafețele iluminate de aştri se află foarte departe de aceştia. Am şi întâlnit această situație, când am prezentat determinarea constantei solare (v. pag.23).

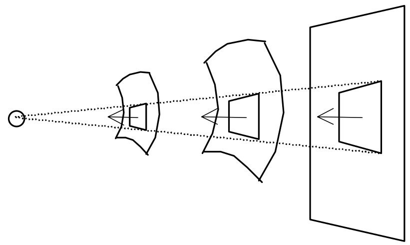


Figura 1. 12

Putem, deci, să considerăm (fig. 1.12) doar situații în care *suprafața plană considerată este foarte mică în raport cu distanța de la sursă, deci în raport cu frontul de lumină sferic*. Inversând rolurile, putem spune că frontul de lumină este *plan*, cel puțin în domeniul care ne interesează.

Totuşi, chiar şi în această ipoteză simplificatoare, apare o altă problemă, şi anume aceea a *orientării* suprafeței plane în raport cu direcția spre sursă. Pentru ca suprafața iluminată să poată fi "lipită" de frontul luminos, ea trebuie să fie aşezată *tangent* la frontul luminos, deci perpendicular pe rază, adică *perpendicular pe direcția spre sursă.* Sau, altfel spus, *normala* suprafeței respective trebuie să treacă prin sursă. Recapitulând, putem preciza că:

> O suprafață plană de dimensiuni mici este iluminată de o sursă cosmică în conformitate cu legea iluminării de la paragraful precedent doar dacă ea este orientată spre sursă, deci dacă *normala ei trece prin sursă*.

Să considerăm acum cazul în care suprafața iluminată nu este orientată "direct" spre sursă, ci are o altă orientare. În figura 1.13, dreptunghiul S_0 este "decupat" din frontul de lumină; evident, energia care-l traversează se distribuie şi pe dreptunghiul S, înclinat cu unghiul α. Vom remarca în treacăt faptul că unghiul celor două plane este egal cu unghiul format de normala lui S cu direcția spre sursă (laturi respectiv perpendiculare).

Dacă notăm cu Φ fluxul luminos, atunci - conform relației (1.16) - dreptunghiul S_0 este traversat de energia $I_0 = \Phi \cdot S_0$. Aceeași energie traversează și dreptunghiul S; singura problemă care mai rămâne este aceea de a stabili legătura dintre ariile celor două dreptunghiuri. Aceasta se stabilește ușor, dacă se ține seama de faptul că dreptunghiul S_0 este *proiecția ortogonală*, pe planul său, a dreptunghiului S.

Relația dintre cele două arii este $S_0 = S \cdot \cos\alpha$; prin urmare, în cazul dreptunghiului S, înclinat față de direcția razelor de lumină, iluminarea va fi $I = \Phi \cdot S \cdot \cos\alpha$. În consecință, deoarece pentru dreptunghiul S_0 rămân valabile relațiile (1.16 - 1.18), care exprimă legea iluminărilor, vom obține, pentru cazul mai general al dreptunghiului S , forma generală a acestei legi:

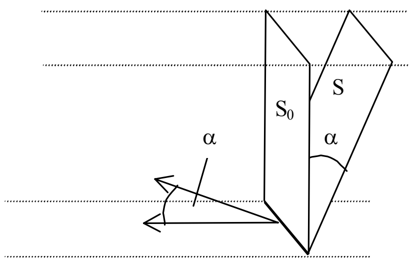


Figura 1. 13

$$I = k \cdot \frac{S \cdot \cos\alpha}{d^2} \quad . \tag{1.20}$$

Cu alte cuvinte,

Iluminarea unei suprafețe plane mici este proporțională cu aria ei și cu cosinusul unghiului pe care-l face normala ei cu direcția spre sursă, dar este invers proporțională cu pătratul distanței până la aceasta.

c. Despre proiecții și (din nou) despre funcțiile trigonometrice

Ideea de *proiecție*, utilizată în paragraful precedent, este de natură geometrică și antrenează trei elemente, pe care le putem identifica răspunzând la următoarele întrebări: "*ce* se proiectează?", "*pe ce* se proiectează?" și "*cum* (prin ce) se proiectează?".

Evident, se proiectează *figuri geometrice*; deoarece orice figură geometrică este o mulțime de *puncte*, proiecția unei figuri este, prin definiție, mulțimea proiecțiilor tuturor punctelor figurii.

Elementele *definitorii* ale proiecției sunt *proiectantele* și *suportul* proiecției. Proiecția unui punct va fi tot un punct, aflat pe un "*suport*" (o dreaptă, un plan, o sferă sau altă suprafață); legătura dintre un punct și proiecția sa este o dreaptă numită *proiectantă*: **proiecția este intersecția proiectantei cu suportul**.

Dreptele proiectante alcătuiesc o *familie* de drepte caracterizate printr-o proprietate comună. În cazul proiecției "*centrale*", toate proiectantele trec printr-un punct numit "centrul" proiecției; în cazul proiecției "*paralele*", proiectantele sunt paralele cu o direcție dată. Dacă acea direcție este *perpendiculară pe suport* (care trebuie să fie o dreaptă sau un plan), spunem că proiecția este "*ortogonală*". În funcție de circumstanțele unei probleme, se pot defini proiecții şi mai particularizate.

În cazul proiecției ortogonale, proiecția oricărui punct pe o dreaptă sau pe un plan este - prin definiție - *piciorul* perpendicularei duse din acel punct pe dreapta sau planul respectiv.

În studiul fenomenelor legate de proiecții (ortogonale, dar nu numai) sunt deosebit de utile câteva funcții care, prin tradiție, poartă numele de "*funcții trigonometrice*": este vorba de funcțiile numite *cosinus* şi *sinus*.

Dăm mai jos o definiție "neconvențională" a acestor funcții, definiție care este mai directă decât cele clasice şi, în plus, este mai organic legată de unghiul căruia îi sunt asociate. În virtutea acestei definiții, funcțiile respective ar putea fi numite, mai pertinent, *funcții goniometrice*.

Vom considera, deci, unghiul α din figura 1.14; vom mai considera că unghiul este "orientat", adică el este "pozitiv" dacă se măsoară într-un sens convenit, cel contrar mişcării acelor de ceasornic.

Latura de la care măsurăm unghiul va fi considerată "*latura principală*" a unghiului, iar cea spre care facem măsurătoarea se va numi latura *secundară* a acestuia.

Mai considerăm şi "*normala*" laturii principale, adică perpendiculara ridicată - tot în sens pozitiv - pe latura principală a unghiului.

Pe latura secundară considerăm un segment de lungime oarecare l; în figura 1.14, segmentul l fost proiectat în l'' pe normala laturii principale şi în l' pe latura principală însăşi. Prin definiție:

Se numeşte SINUS al unghiului α *raportul dintre proiecția* l'' *a segmentului* l *şi segmentul* l *însuşi.*

Se numeşte COSINUS al unghiului α *raportul dintre proiecția* l' *a segmentului* l *şi segmentul* l *însuşi.*

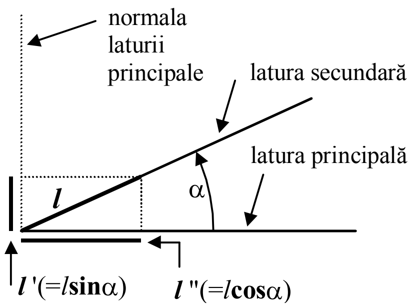


Figura 1. 14

Ceea ce conferă importanță acestor două mărimi este faptul că *ele depind doar de unghiul respectiv* (α), nu şi de lungimea segmentului arbitrar l; într-adevăr, dacă se ia alt segment, segmentele l, l' şi l'' din figură rămân în aceleaşi raporturi (datorită ASEMĂNĂRII triunghiurilor din figură) şi valorile sinusului şi cosinusului vor rămâne neschimbate!

Deoarece funcțiile trigonometrice depind numai de unghi, valorile lor pot fi calculate imediat ce se dă valoarea unghiului respectiv; multă vreme oamenii au utilizat "tabele" (sau "table") care conțin funcțiile trigonometrice cu un "pas" mic de creştere a unghiului. Azi, aceste valori ne sunt furnizate de orice calculator electronic.

Din definițiile date rezultă imediat relațiile care dau mărimile proiecțiilor unui segment pe o dreaptă și pe normala dreptei respective:

$$\cos\alpha = \frac{l'}{l}, \quad \sin\alpha = \frac{l''}{l} \quad \Rightarrow \quad l' = l\cdot\cos\alpha, \quad l'' = l\cdot\sin\alpha \quad . \qquad (1.21)$$

Figura 1.14' prezintă graficul funcției *cosinus*, pentru valori ale variabilei cuprinse între 0° și 360°; acest grafic se reproduce la nesfârșit în afara intervalului considerat deoarece, conform definiției, ca și celelalte funcții trigonometrice, funcția *cosinus* are o variație *periodică*, cu perioada de 360°.

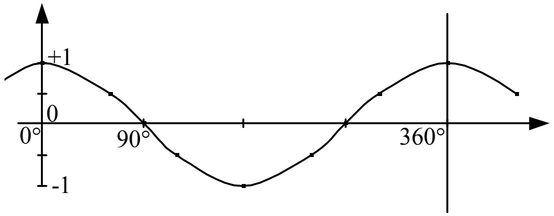


Figura 1.14': Graficul funcției *cosinus*

d. Implicații meteorologice şi climatice

Fie o porțiune a suprafeței Pământului, suficient de mică pentru a putea fi considerată plană, în absența unor forme de relief; normala acestei porțiuni de teren este ceea ce numim *verticala* locului. La răsăritul Soarelui, unghiul format de verticala locului cu direcția spre astrul zilei este maxim, având valoarea de 90°. Iluminarea este proporțională cu *cosinusul* unghiului respectiv, iar cosinusul are valoarea 0 în acest caz; în acest moment, valoarea iluminării directe a terenului este nulă.

De-a lungul unei zile, unghiul amintit variază în mod continuu, atingând la amiază o valoare minimă; în acest moment iluminarea terenului este maximă. Temperatura solului suferă, deci, o variație diurnă (zilnică) corespunzătoare.

Vom vedea mai târziu că unghiul dintre cele două direcții (numit şi *distanță zenitală* a Soarelui) are valoarea minimă în momentul în care Soarele "trece la meridian", adică traversează planul meridianului geografic al locului respectiv.

Dar, chiar în momentul trecerii la un meridian, diferitele zone geografice de pe meridianul respectiv sunt iluminate foarte diferit.

Într-adevăr, este uşor să ne dăm seama că porţiunile plane şi orizontale de teren aflate la diferite latitudini sunt *orientate diferit* în raport cu direcţia razelor solare (fig. 1.15); normalele lor formează unghiuri foarte diferite cu direcţia spre Soare.

În general, distanţa zenitală a Soarelui la amiază are valori mici în apropierea ecuatorului, ajungând însă aproape de 90° lângă poli; iluminările diferitelor zone variază corespunzător, iar consecinţa acestui fapt este existenţa *zonelor climatice* de pe suprafaţa Pământului.

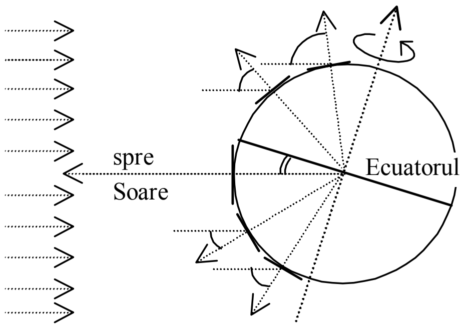


Figura 1. 15

Zonele climatice sunt delimitate, tradiţional, de câteva paralele geografice particulare, numite *tropice*, respectiv *cercuri polare*. Pentru a înţelege situaţia acestora, trebuie să pornim de la următorul fapt, pe care-l menţionăm anticipând unele elemente din partea a IV-a a cărţii:

În timpul mişcării pe orbită, axa de rotaţie a Pământului se deplasează "prin translaţie", păstrându-şi orientarea neschimbată; în consecinţă, unghiul dintre planul ecuatorial terestru şi planul orbitei Pământului[11] este constant ($\varepsilon \cong 23°30'$)

În timpul unui an, unghiul dintre axa de rotaţie a Pământului şi direcţia spre Soare variază de la $90°+\varepsilon$ la $90°-\varepsilon$. Figura 1.15' pune în evidenţă una din cele două situaţii extreme, care au loc la interval de o jumătate de an şi care prezintă o simetrie nord-sud una faţă de alta.

Se poate observa faptul că, în fiecare din situaţii, există un singur punct în care Soarele se află la verticala locului; acest punct are latitudinea $+\varepsilon$ (respectiv $-\varepsilon$, în cealaltă emisferă). Ne putem da seama că, pentru punctul dat, acest fenomen are loc doar o dată pe an; pe de altă parte, în toate punctele paralelului geografic respectiv are loc, în

[11] Notat cu ε, el reprezintă, în acelaşi timp, unghiul dintre normala orbitei şi axa de rotaţie a Pământului, cele două unghiuri având laturile respectiv perpendiculare.

acea zi, acelaşi fenomen.

Se numesc *tropice* acele paralele geografice în ale căror puncte Soarele se află, *o singură dată în decursul anului*, pe verticala locului.

Pe de altă parte, se poate observa uşor că există un singur punct în care razele de lumină sunt tangente la suprafaţa terestră; în acest punct Soarele rămâne toată ziua pe orizont.

Fenomenul are loc tot o singură zi pe an; pe de altă parte, el are loc, în acea zi, în toate punctele acelui paralel geografic.

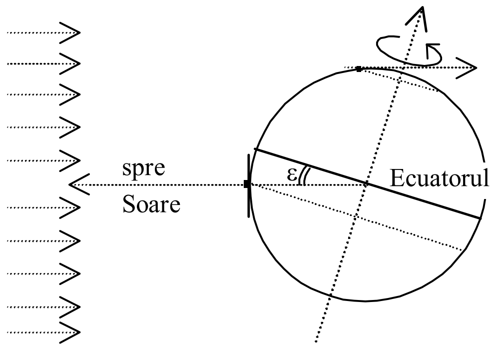


Figura 1.25': Ziua solstiţiului

Se numesc cercuri polare acele paralele geografice în ale căror puncte Soarele rămâne toată ziua pe orizont, *o singură dată în decursul anului*.

Ziua în care au loc fenomenele amintite se mai numeşte ziua *solstiţiului*; figura 1.15' prezintă situaţia din ziua solstiţiului de iarnă (pentru emisfera nordică). Peste o jumătate de an situaţia se inversează şi vorbim despre solstiţiul de vară.

Este interesant să mai menţionăm că în ziua solstiţiului este "miezul" anotimpului respectiv în emisfera nordică; pentru zona de dincolo de cercul polar, este miezul zilei sau al nopţii polare.

Probleme

Problema 1.1.4. Să se studieze dependenţa de latitudinea locului a iluminării suprafeţelor terestre plane şi orizontale, în ipoteza că axa Pământului ar fi perpendiculară pe direcţia Soare-Pământ. Iluminarea unei astfel de suprafeţe ar fi diferită în diferite momente ale anului?

1.1.4 Perceperea luminii; bazele fotometriei vizuale

a. Senzaţia luminoasă

Dacă în cazul Soarelui, dată fiind iluminarea substanţială produsă de el pe Pământ, se pot efectua determinări fotometrice absolute, astfel de determinări nu se pot efectua asupra celor mai multe obiecte cereşti, care produc pe Pământ iluminări extrem de reduse. Orice astfel de încercare se loveşte de faptul că, în cel de al doilea caz, erorile de determinare depăşesc cu mult ordinul de mărime al mărimilor de determinat.

Totuşi, vederea umană este suficient de sensibilă pentru a detecta iluminările produse de stele şi, mai mult, ea este foarte bine înzestrată pentru a sesiza *diferenţele* de iluminări produse de diferite surse cosmice de lumină.

În consecinţă, deşi vederea este subiectivă, deci nu poate efectua aprecieri absolute ale iluminărilor, ea este capabilă să stabilească o scară *relativă* de "străluciri" ale aştrilor nopţii, scară fundamentală pentru astronomie.

Orice prezentare a fotometriei astronomice vizuale trebuie să înceapă, în consecinţă, cu analiza relaţiei dintre iluminarea (excitarea) ochiului de către o sursă şi ceea ce numim "senzaţie" luminoasă, în sens de "entitate analizabilă de către creier".

Deci, energia luminoasă care pătrunde în ochi este un *excitant* care produce o *senzaţie* vizuală; senzaţia vizuală este caracterizată printr-o *intensitate*, apreciată în mod *subiectiv* de către fiecare observator. Totuşi, anumite caracteristici generale ale dependenţei intensităţii senzaţiei luminoase de intensitatea factorului excitant pot fi decelate chiar dintr-o analiză atentă a experienţei curente.

Astfel, este evident că, dacă intensitatea excitaţiei creşte, va creşte şi intensitatea senzaţiei produse; totuşi, experienţa curentă ne arată că această dependenţă nu este foarte simplă şi în nici un caz nu este liniară. De exemplu, dacă într-o cameră în care arde o lumânare se mai aduce o lumânare aprinsă, efectul este imediat remarcat; dacă în aceeaşi cameră arde un bec puternic şi se mai aprinde o lumânare, efectul nu este tot atât de impresionant ca în cazul precedent. În general, deci, senzaţia produsă de un excitant suplimentar depinde şi de nivelul excitaţiei *iniţiale*.

Acelaşi gen de reacţie se poate evidenţia şi în studiul auzului, ceea ce ne face să presupunem că este vorba de o caracteristică generală a simţurilor noastre; ea a fost surprinsă în enunţul legii lui Weber-Fechner.

b. Legea Weber - Fechner

Fie E intensitatea excitaţiei iniţiale, S intensitatea senzaţiei iniţiale, ΔE variaţia excitaţiei şi ΔS variaţia senzaţiei; *legea psiho-fiziologic*ă *a lui Weber - Fechner* afirmă că:

> *Variaţia intensităţii senzaţiei este direct proporţională cu variaţia intensităţii excitaţiei, dar invers proporţională cu intensitatea iniţială a excitaţiei.*

Cu notaţiile de mai sus şi notând cu K factorul de proporţionalitate, avem:

$$\Delta S = K \cdot \frac{\Delta E}{E} \quad .$$

Cu alte cuvinte, legea Weber - Fechner arată că:

- sensibilitatea simţurilor umane este deosebit de mare când nivelul excitaţiei iniţiale (E) este mic;

- simţurile umane devin aproape insensibile când nivelul excitaţiei iniţiale (E) este foarte mare.

Acest gen de "răspuns" al văzului la factorii excitanţi este de natură să asigure o *sensibilitate* deosebită a acestui simţ atunci când el acţionează într-o mare sărăcie de informaţie (de exemplu, noaptea) dar, în acelaşi timp, el asigură o *protecţie* (desigur, limitată, dar eficientă) a văzului împotriva surselor prea puternice de lumină.

Căutând să găsim o expresie a senzaţiei în funcţie de excitant, vom scrie legea Weber-Fechner sub o formă care pune în evidenţă "viteza de creştere" a senzaţiei ($\Delta S / \Delta E$) în funcţie de excitant:

$$\frac{\Delta S}{\Delta E} = K \cdot \frac{1}{E} \quad . \qquad (1.21')$$

Putem spune, deci, că:

> Viteza de creştere a funcţiei căutate (S) este, în orice punct, invers proporţională cu valoarea variabilei independente (E).

Dar o astfel de funcţie a fost descoperită încă din secolul al XVI-lea de către John Napier (sau Neper); ea este "*funcţia logaritmică*" şi este legată de noţiunea de "*logaritm natural*" al unui număr.

c. Funcţia logaritmică

Logaritmul numărului x - într-o bază dată, b - este, prin definiţie, numărul y (notat şi $\log_b x$) care arată la ce putere trebuie să fie ridicat b, pentru a-l obţine pe x. Cu alte cuvinte, avem:

$$y = \log_b x \Leftrightarrow x = b^y .$$

Baza logaritmilor "zecimali" este - evident - numărul 10; baza logaritmilor "naturali" este aşa-numitul "număr e" (e = 2.71...), a cărui definiţie poate fi găsită în manualele de analiză matematică.

Funcţia logaritmică se poate studia prin metode elementare, aşa cum se studiază în primul an de liceu, prin aşa-zisele "tabele de variaţie" şi prin admiterea tacită a unor proprietăţi de continuitate.

Graficul funcţiei este foarte elocvent în privinţa variaţiei "vitezei de creştere" a funcţiei logaritmice; figura 1.15" prezintă un astfel de grafic, pentru baza 2 a logaritmilor consideraţi, bază pentru care evaluările numerice se pot face simplu, chiar mintal.

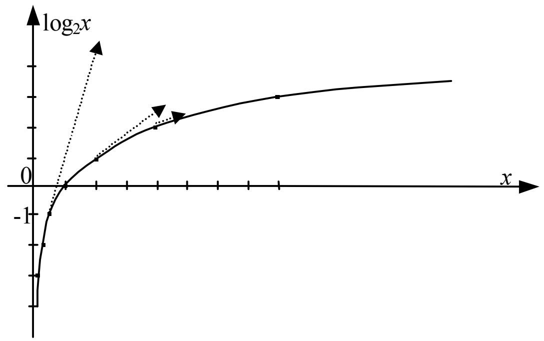


Figura 1.15": Graficul funcţiei logaritmice

Este evident (v. săgeţile) că, dacă variabila independentă are valori foarte mici, o creştere cât de mică a acestei variabile antrenează după sine o variaţie importantă a valorii funcţiei. Pe de altă parte, dacă variabila independentă are deja valori relativ mari, variaţii sensibile ale valorii funcţiei se obţin doar dacă au loc variaţii importante ale variabilei independente.

Evident, caracteristicile funcţiei logaritmice corespund întocmai legii Weber-Fechner, unde variabila independentă este excitaţia, iar funcţia este senzaţia.

Vom menţiona, în încheiere, că baza logaritmilor utilizaţi nu este esenţială, deoarece trecerea de la o bază la alta se realizează prin înmulţirea cu o constantă ce depinde doar de cele două baze.

d. Derivata şi primitiva unei funcţii

Dacă tot am lărgit câmpul noţiunilor matematice legate de fenomenele propagării şi percepţiei energiei luminoase, să menţionăm că:

> Fiind dată o funcţie reală cu valori reale, funcţia care asociază fiecărei valori a variabilei viteza de creştere a funcţiei date în acel punct, se mai numeşte "*derivata*" funcţiei iniţiale.

Dacă admitem că viteza de variaţie a funcţiei, într-un punct oarecare, este:

$$\lim_{x \to x_0} \frac{\Delta f(x)}{\Delta x} = \lim_{x \to x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$$

atunci, evident, definiţia derivatei rezultă imediat:

$$f'(x_0) = \frac{df(x_0)}{dx} = \lim_{x \to x_0} \frac{\Delta f(x)}{\Delta x} = \lim_{x \to x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$$

De multe ori, însă, ca şi în cazul legii Weber-Fechner, se pune problema de a afla care este funcţia care are o anumită funcţie drept derivată.

> Fiind dată o funcţie reală cu valori reale, funcţia care are drept derivată funcţia dată se mai numeşte "primitiva" acesteia, sau încă, "integrala nedefinită" a ei.

Deoarece derivata unei constante este nulă ("viteza de variaţie"!), primitiva unei funcţii este definită abstracţie făcând de o constantă arbitrară, aditivă; cu alte cuvinte, primitiva unei funcţii este, de fapt, o familie de funcţii care diferă una de alta printr-o constantă. Găsirea derivatei unei funcţii se mai numeşte "derivare", iar găsirea primitivei se mai numeşte "integrare"; dar acestea sunt noţiuni care pot fi găsite în toate cărţile de analiză matematică şi nu este aici locul pentru tratarea lor efectivă.

e. Definitivarea legii Weber-Fechner

Şi, într-adevăr, efectuând trecerea la limită în relaţia (1.21') şi integrând-o în ambii membrii, găsim:

$$S = S_0 + K \cdot \ln \frac{E}{E_0} \quad . \tag{1.22}$$

În general se preferă utilizarea logaritmilor zecimali[12], care permit evaluări numerice sumare mai rapide ("dintr-o privire"); cum logaritmii în două baze diferite sunt proporționali, trecerea la logaritmii zecimali nu face decât să schimbe factorul de proporționalitate K într-unul nou (fie acesta k). În consecință, se obține următoarea expresie a senzației vizuale în funcție de excitație:

$$S = S_0 + k \cdot \log \frac{E}{E_0} \quad , \tag{1.23}$$

unde S_0 este senzația corespunzătoare unei excitații inițiale E_0.

Subiectivismul observatorului se manifestă, evident, în "fixarea" constantelor S_0 şi k.

Oarecum metaforic, putem spune că legea Weber-Fechner este o exprimare a faptului că funcția logaritmică este "încorporată" în chiar organismul nostru. În contextul acestei cărți, mai important este, însă, faptul că legea Weber-Fechner poate fi luată ca punct de pornire pentru fotometria stelară.

1.1.5 Magnitudinile stelare

a. Puțină istorie

Funcționarea "logaritmică" a vederii umane face ca ochiul nostru să fie un instrument foarte sensibil pentru compararea slabelor străluciri ale stelelor.

În antichitate, toate stelele vizibile cu ochiul liber au fost împărțite în şase *clase* de strălucire, numite *magnitudini* sau *mărimi* stelare; stelele cele mai strălucitoare (cam 20 la număr) s-au numit "de magnitudinea întâia" (1^m), iar cele abia vizibile au fost numite "de magnitudinea a 6-a" (6^m).

Celelalte stele au fost repartizate, gradual, în clasele a 2-a până la a 5-a. Ulterior, au fost evaluate şi magnitudini "fracționare" ajungându-se, în secolul al XIX-lea, la aprecierea vizuală a zecimii de magnitudine.

---

[12] Notația "ln" se referă, evident, la logaritmii "naturali", a căror bază este numărul *e*.

După inventarea telescoapelor astronomice, stelele vizibile doar prin telescop au primit magnitudini mai mari decât 6, prelungindu-se scara magnitudinilor tot pe baza observațiilor vizuale.

Pe de altă parte, determinarea mai sigură a magnitudinilor a dus la o mai bună definire a claselor, iar unii aştrii de magnitudinea 1^m au fost "scoşi" din clasa respectivă, primind magnitudinea 0^m sau chiar magnitudini negative; este cazul, în special, al planetelor şi al unui mic număr de stele foarte strălucitoare.

b. Utilizarea legii Weber-Fechner; formula lui Pogson

Evident, "magnitudinile" stelare sunt măsuri ale intensității senzației vizuale; să rescriem, deci, legea lui Weber-Fechner înlocuind pe S (senzația) cu m (magnitudinea) şi pe E (excitația) cu I (iluminarea pupilei). Scăzând din ambii membrii ai relației (1.23) senzația (magnitudinea) inițială, obținem:

$$m - m_0 = k \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad . \qquad (1.24)$$

În 1856, Pogson a propus să se considere că iluminarea pupilei, produsă de o stea de magnitudinea întâi, este de 100 de ori mai mare decât cea produsă de o stea de magnitudinea a 6-a. De altfel, această ipoteză a fost ulterior confirmată. Aplicând relația (1.24) pentru cele două magnitudini extreme, obținem:

$$1 - 6 = k \cdot \log \frac{100}{1} \text{ , de unde } \; -5 = k \cdot \log 100 = k \cdot \log 10^2 = k \cdot 2$$

şi, în final, $k = -2,5$.

Se obține, astfel, relația numită "*formula lui Pogson*", care exprimă diferența magnitudinilor a două stele, în funcție de raportul iluminărilor produse de acestea pe retină:

$$m - m_0 = -2,5 \cdot \log \frac{\mathrm{I}}{\mathrm{I}_0} \qquad (1.25)$$

c. O ipoteză hazardată

Să presupunem, în lipsa altor informații despre stele, că ele -

toate! - ar avea aceeaşi intensitate luminoasă, deci că ele ar avea aceleaşi caracteristici şi ar emite aceeaşi cantitate de energie în spaţiu.

În această ipoteză (hazardată, evident!), diferenţele de magnitudine ar putea rezulta doar din faptul că stelele s-ar afla la distanţe diferite. Să considerăm că stelele cele mai strălucitoare (deci cele mai apropiate de noi), s-ar afla la o anumită distanţă *d*, iar stelele cele mai slabe s-ar afla la distanţa D de noi. Am putea determina pe D în funcţie de d ?

Formula lui Pogson ne arată că:

$$m - m_0 = -2{,}5 \cdot \log\frac{I}{I_0} \Rightarrow \log\frac{I}{I_0} = -\frac{m - m_0}{2{,}5} \Rightarrow \frac{I}{I_0} = 10^{-\frac{m-m_0}{2{,}5}} \quad ;$$

în ipoteza noastră diferenţa de magnitudini este cunoscută, deci mai rămâne să stabilim relaţia dintre iluminările pupilei - produse de stele - şi distanţele la care se află acestea.

Legea iluminărilor, în forma dată de relaţia (1.18), arată că iluminarea pupilei, produsă de o stea este proporţională cu suprafaţa pupilei (*s*), factorul de proporţionalitate k depinzând de stea; în acelaşi timp, iluminarea este invers proporţională cu pătratul distanţei la care se află steaua. Deci, putem scrie:

$$I = k \cdot \frac{s}{d^2}, I_0 = k \cdot \frac{s}{D^2} \Rightarrow \frac{I}{I_0} = \frac{D^2}{d^2} \quad ;$$

prin urmare,

$$\frac{I}{I_0} = \frac{D^2}{d^2} = 10^{-\frac{m-m_0}{2{,}5}} \Rightarrow \frac{D}{d} = 10^{-\frac{m-m_0}{5}} \quad .$$

Dacă luăm în considerare doar stelele vizibile cu ochiul liber ($m = 1$, $m_0 = 6$), vom obţine $D / d = 10$. Acest rezultat era de aşteptat, deoarece noi ştim că stelele de magnitudine 6^{m} sunt de 100 de ori mai slabe decât cele de magnitudine 1^{m}, deci produc o iluminare a pupilei de 100 de ori mai mică decât acestea; legea iluminărilor ne arată, *direct*, în ipoteza admisă de noi, că ele trebuie să se afle la o distanţă de 10 ori mai mare. Mult calcul pentru nimic!

Calculul efectuat de noi va conduce însă la un rezultat interesant dacă luăm în considerare *toate* stelele cunoscute, inclusiv cele vizibile doar prin telescoape; în acest caz magnitudinile variază de la -1 la +24, dacă luăm în considerare şi îmbunătăţirea scării magnitudinilor realizată în timpurile moderne. Lăsăm în seama cititorului să efectueze calculul pentru acest caz.

Oricum, ipoteza noastră nu are nici o bază; deci, până când o vom putea înlocui prin alta - mai justificată - sau până vom obţine alte informaţii despre distanţele interstelare sau despre luminozităţile reale ale stelelor, nu ne rămâne altceva mai bun de făcut decât să observăm cu asiduitate stelele şi să determinăm cât mai bine magnitudinile lor, în speranţa că aceste magnitudini ne vor fi utile la un moment dat.

d. Metoda lui Argelander

Este tocmai ceea ce au făcut astronomii multe secole la rând! Să amintim aici că "Almagesta" lui Ptolemeu conţinea un catalog cu 1028 de stele ale căror magnitudini fuseseră determinate la acea vreme, evident, pe cale vizuală. Cataloagele actuale conţin milioane de stele ale căror magnitudini au fost determinate prin mijloace mai precise şi cu un randament mult mai mare. Totuşi, există situaţii în care estimarea vizuală a magnitudinilor se dovedeşte necesară şi utilă.

Metoda care permite această estimare poartă numele lui Argelander; ea presupune că, în apropierea stelei a cărei magnitudine vrem să o determinăm, se găsesc câteva stele ale căror magnitudini sunt cunoscute (ele sunt stele "de catalog"). Să notăm cu *a*, *b*, *c* etc. stelele de catalog şi cu *x* steaua de determinat.

Metoda lui Argelander este o metodă de interpolare liniară, bazată pe faptul că scara magnitudinilor este o scară logaritmică, la fel ca şi scara subiectivă de "străluciri" a fiecărui observator.

În virtutea legii Weber-Fechner, ochiul poate sesiza foarte bine micile diferenţe dintre strălucirile stelelor respective. Argelander a propus utilizarea unei unităţi *ad hoc* pentru diferenţele de strălucire, unitate numită "grad"; metoda sa constă în efectuarea de "comparaţii" între toate stelele observate, comparaţii urmate de determinarea valorii "gradului".

Observatorul va evalua, după aprecierea sa, diferenţele de strălucire din cuplurile de stele consemnând, pentru fiecare cuplu, diferenţa de strălucire exprimată în grade, mereu în acelaşi sens, de exemplu de la steaua mai slabă la cea mai strălucitoare; de exemplu, notațiile "*b* 3 *a*", "*c* 2 *d*" etc. vor consemna că observatorul apreciază steaua *a* cu trei grade mai strălucitoare decât *b*, steaua *d* cu două grade mai strălucitoare decât *c* etc.

De asemenea, observatorul evaluează şi diferențele de strălucire dintre steaua *x* şi stelele de magnitudine cunoscută: *x* 2 *a*, *c* 1 *x* etc.

Fiecare comparație permite o evaluare - prin regula de trei, simplă - a valorii gradului, exprimată în magnitudini. Valoarea generală adoptată va fi, evident, media determinărilor individuale.

Utilizarea acestei valori în cazul comparațiilor care implică steaua de magnitudine necunoscută permite, în continuare, determinarea magnitudinii acesteia, tot prin regula de trei, simplă; media determinărilor individuale va furniza estimarea finală a magnitudinii dorite.

Trebuie accentuat faptul că valoarea "gradului" de strălucire depinde de observator, dar şi de stelele observate; acelaşi observator va defini implicit grade diferite în zone diferite.

Ca orice metodă subiectivă, metoda lui Argelander nu este foarte precisă, dar este suficient de sigură; precizia determinărilor depinde, în bună măsură, de antrenamentul observatorului. Pentru ca precizia să fie cât mai bună, este de dorit ca stelele "de comparație" să fie relativ apropiate (ca magnitudine) de steaua necunoscută; de asemenea, este de dorit ca ele să fie cât mai apropiate pe cer, astfel încât stelele unei comparații să poată fi văzute simultan de observator.

Evident, metoda lui Argelander poate fi aplicată atât direct, cu ochiul liber, cât şi utilizând un instrument (binoclu, lunetă sau telescop). De multe ori, luați prin surprindere de un fenomen, suntem obligați să recurgem la determinarea vizuală a magnitudinii unor aştri: la apariția unui meteor, a unui satelit artificial, a unei comete, a unei stele noi, etc. Departe de a fi o operație incidentală, determinarea vizuală a magnitudinilor stelare este o operație curentă în cazul *stelelor variabile*, a căror strălucire variază în timp, din motive pe care le vom discuta în altă parte.

O caracteristică a metodei este obligativitatea utilizării datelor astronomice acumulate până la epoca observației, date stocate în cataloagele stelare. În faza de *pregătire* a observațiilor, trebuie doar să extragem din catalog magnitudinile stelelor învecinate cu obiectul pe care-l cercetăm. Dacă nu am avut posibilitatea de a ne pregăti observațiile, va trebui să înregistrăm cu mare acuratețe toate circumstanțele observației efectuate, iar apoi să luăm dintr-un catalog datele necesare prelucrării datelor de observare, în vederea efectuării calculelor ce ne vor da valoarea magnitudinii dorite.

O condiție *sine qua non* pentru determinarea magnitudinilor prin metoda lui Argelander este identificarea corectă a stelelor observate cu stelele din catalogul utilizat; în caz că această identificare este eronată, rezultatul va fi catastrofal.

Pentru identificarea corectă a obiectelor dintr-o zonă a cerului se utilizează, de regulă, atlase cereşti sau hărți ale zonei realizate pe baza pozițiilor date de cataloagele stelare. De asemenea, pot fi utile - mai ales în cazul observării vizuale a meteorilor - cunoştințele de *uranografie*, bazate pe recunoaşterea *constelațiilor* şi a stelelor componente ale unor constelații (v. partea a II-a a lucrării de față).

e. Magnitudini stelare absolute

Magnitudinile stelare *aparente* introduse de noi nu permit decât o comparare a strălucirilor aparente ("de pe cer") ale stelelor; ele nu permit compararea strălucirilor *reale* ale stelelor, comparație care ne-ar putea duce la o evaluare a caracteristicilor fizice stelare.

De aceea se introduce o altă mărime, numită ***magnitudine absolută***; deşi ea nu poate fi determinată decât dacă se cunoaşte distanța până la stea, o definim chiar de pe acum, cu titlu de inventar:

> *Magnitudinea absolută M* a unui astru este magnitudinea pe care ar avea-o acel astru *dacă el s-ar afla la o distanță standard* de observator, aceeaşi pentru toate stelele[13].

Fie *m* magnitudinea aparentă a unei stele aflată la distanța de Δ *pc*; conform formulei lui Pogson (1.25), avem: $M = -2{,}5\lg I'$, unde *M* este magnitudinea absolută, iat *I'* este iluminarea produsă de stea pe retină, de la distanța "standard". Legea iluminărilor (1.19) dă:

$\dfrac{I}{I'} = \dfrac{10^2}{\Delta^2} \quad \Rightarrow \quad I' = \dfrac{I \cdot \Delta^2}{100}$, de unde $M = -2{,}5 \cdot (\lg I + 2\lg\Delta - 2)$.

În final, $$M = 5 + m - 5\lg\Delta\,, \qquad (1.25')$$

care mai este numită "formula magnitudinilor absolute".

---

[13] *10 parseci* (10 pc); v. definiția parsecului în cap. 3.1

Capitolul 1.2

GEOMETRIA PERCEPȚIEI VIZUALE

1.2.1 Obiectul luminat de o singură sursă (punctuală)

a. Umbra

Pentru început, să considerăm o sursă punctuală, deci foarte mică în raport cu distanța până la obiect; în acest caz, orice obiect opac produce "separarea" spațiului în două zone: una prin care se propagă lumina provenită de la sursa dată și alta în care această lumină nu poate pătrunde (fig. 1.16).

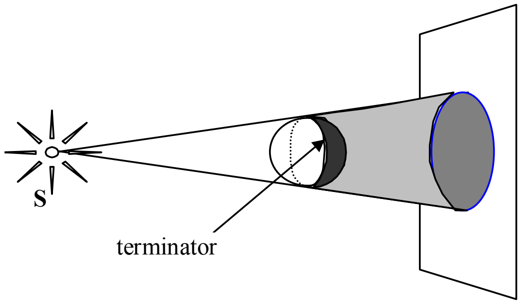


Figura 1. 16

Porțiunea fără lumină a spațiului este delimitată de corpul însuși și de o o suprafață formată din reuniunea tuturor semidreptelor care trec prin sursă și sunt tangente corpului opac. O astfel de suprafață se numește "*pânză conică*", iar domeniul cuprins în interiorul ei se numește "*con*"; semidreptele amintite se mai numesc "*generatoare*" ale conului. Rezultă că:

> Orice corp opac *luminat de o sursă punctuală* este însoțit, în partea opusă sursei, de un con de întuneric al cărui vârf este în sursa luminoasă și ale cărui generatoare sunt tangentele duse din sursă la corpul respectiv.

Dacă obiectul opac este de formă arbitrară, pânza conică este "neregulată"; dacă obiectul este sferic, pânza conică se numește "circulară"; iar conul de întuneric va fi un *con circular*. Pentru a simplifica discuția, ne vom ocupa în continuare numai de corpuri opace sferice, ale căror conuri de întuneric asociate vor fi conuri circulare.

Dacă o suprafață opacă (de exemplu, planul unui perete) intersectează conul de întuneric al unui obiect, pe acea suprafață, care este și ea luminată de sursă, apare o zonă neagră, întunecată, care este *umbra obiectului* pe suprafața respectivă. Cititorul își poate da seama, ușor, că:

> Umbra unui corp luminat de o sursă punctuală este *proiecția centrală* a acelui corp pe o suprafață, centrul proiecției fiind chiar sursa de lumină.

Din experienţa cotidiană, se ştie că forma şi mărimea umbrei unui corp depind nu numai de mărimea şi forma corpului dar şi de forma şi orientarea "ecranului" pe care se vede umbra, precum şi de distanţele sursă-obiect şi obiect-ecran. Modificând în mod convenabil unul sau mai mulţi din aceşti parametri, se pot realiza neaşteptate "jocuri de umbre"; există chiar o artă a acestor jocuri.

Întorcându-ne însă la analiza ştiinţifică a umbrei, menţionăm, în încheiere, că pentru "conul de întuneric" al unui obiect se mai utilizează şi denumirea de "*con de umbră*". De asemenea, este bine să menţionăm de pe acum că - în practică - în conul de umbră al unui obiect poate pătrunde lumină, de la alte surse decât cea "principală" pe care am luat-o în considerare mai sus. De exemplu, noaptea ne aflăm în conul de umbră al Pământului, deci la noi nu ajunge (cel puţin direct) lumina Soarelui; totuşi, putem vedea lumina - mult mai slabă - provenită de la alţi aştri. De aceea, în practică, nu identificăm umbra cu "întunericul"; această identificare este curentă doar în consideraţiile teoretice pe care le facem în unele cazuri.

b. Terminatorul

Pânza conului de umbră al unui obiect "atinge" obiectul respectiv de-a lungul unei curbe care se numeşte *terminator* (fig. 1.16).

Evident, fiecare punct al terminatorului este punctul de tangenţă al suprafeţei obiectului cu o generatoare a conului de umbră. Terminatorul poate avea forme foarte complicate; de exemplu, în multe cazuri terminatorul nu este nici măcar o "curbă plană", adică punctele ei nu se află toate într-un acelaşi plan (astfel de curbe se numesc "strâmbe").

În cazul unui obiect sferic, terminatorul este un cerc, ceea ce simplifică mult raţionamentele matematice legate de umbrele sferelor.

Este important să reţinem că, întotdeauna, există o parte a suprafeţei unui obiect, care se află în conul de umbră al obiectului însuşi, dacă acesta este luminat de o singură sursă, punctuală:

> Terminatorul unui obiect este tocmai *graniţa dintre partea luminată şi partea din umbră* a acelui obiect.

Marginea (conturul) umbrei este proiecţia centrală a terminatorului; într-adevăr, fiecare rază (proiectantă) care trece printr-un punct al terminatorului ajunge într-un punct de pe marginea (conturul) umbrei (fig. 1.16). Această constatare ne poate ajuta, de multe ori, să ne facem o idee mai clară despre terminator şi - de ce nu? - chiar despre "conturul" corpului, urmărind conturul umbrei; după unii, această urmărire a conturului umbrelor ar fi stat la originea desenului.

Mai remarcăm un fapt aparent banal, dar care este important pentru un observator:

> Din nici un punct situat în conul de umbră al unui corp sursa nu poate fi văzută, fiind *ocultată* (ascunsă) de corp.

Evident, poziția terminatorului pe suprafața unui corp depinde de poziția pe care o are sursa luminoasă față de corp; deci, dacă obiectul respectiv se află în mişcare față de sursă, *terminatorul se va deplasa continuu pe suprafața sa*. Acelaşi lucru se întâmplă şi dacă obiectul este fix în raport cu sursa, dar efectuează o mişcare de rotație în jurul unei axe proprii. Evident, aici se află originea alternanței zi-noapte în punctele suprafeței Pământului. Punctele de pe terminatorul Pământului sunt - întotdeauna - punctele în care are loc fie răsăritul, fie apusul Soarelui.

Probleme

Problema 1.2.1. Să se demonstreze că terminatorul unui obiect sferic luminat de o sursă punctuală de lumină este un cerc; să se exprime raza acestui cerc în funcție de raza obiectului şi de distanța de la sursă la centrul acestuia. Ce se întâmplă dacă distanța dintre obiect şi sursă tinde la infinit?

Problema 1.2.2. Fie un obiect sferic luminat de o singură sursă punctuală (aflată la mare distanță), obiect care este fix în raport cu sursa, dar se roteşte uniform în jurul unui diametru cu orientare arbitrară față de direcția spre sursă. Să se determine, în raport cu axa de rotație, zonele suprafeței obiectului care sunt luminate permanent, cele care nu sunt niciodată luminate şi cele care sunt luminate doar timp de o fracțiune din perioada de rotație. Această fracțiune este întotdeauna aceeaşi?

1.2.2 Obiectul luminat de o singură sursă (nepunctuală)

a. Umbre multiple

Să considerăm, mai întâi, cazul unui corp (sferic*) luminat de două surse punctiforme*.

Figura 1.17 ne dă o imagine a situației, reprezentată, pentru simplitate, în planul determinat de sursele S_1, S_2 şi centrul O al corpului sferic dat. Se vede că fiecărei surse îi corespunde un "con de umbră", dar ... aceste conuri nu mai sunt, în întregime, conuri "de întuneric"!

Într-adevăr, punctul A, aflat în "conul de umbră" x_1, primeşte totuşi lumină de la sursa S_2, fiind lipsit numai de lumina sursei S_1. Asemănător se petrec lucrurile şi în punctele din conul x_2, (de ex., punctul E).

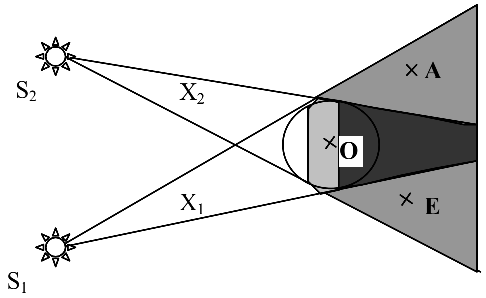


Figura 1. 17

Ne dăm seama imediat că întuneric deplin este doar în domeniul care aparține simultan conurilor x_1 şi x_2 (porțiunea dublu haşurată din fig. 1.17). În restul celor două conuri nu avem de a face cu o umbră propriu-zisă ci cu o umbră *atenuată* de lumina unei alte surse.

Rezultă că *un corp iluminat de două surse punctiforme de lumină crează două conuri de umbră atenuată; intersecția acestor conuri dă naştere unui con de umbră propriu-zisă pentru corpul respectiv.*

Ce se întâmplă, în acest caz, cu umbra corpului? Ea va depinde, în mod esențial, de locul unde se plasează ecranul pe care se "creează" umbra şi, de regulă, nu avem o singură umbră ci două, dar ambele sunt "umbre atenuate".

Gradul de atenuare depinde de intensitățile celor două surse; metoda iluminării cu mai multe surse este utilizată în situațiile în care umbrele nete (propriu-zise) sunt supărătoare; exemplele cele mai frecvente le întâlnim în lumea spectacolelor - pe scena teatrului sau în studiourile de film şi televiziune.

Lăsăm în seama cititorului să studieze diferite configurații ale umbrelor multiple (atenuate) pe ecrane plasate în diferite poziții şi pentru diferite aşezări ale surselor şi ale obiectului iluminat.

Reîntorcându-ne la situația redată în figura 1.17, mai reținem faptul că:

Din interiorul conului de umbră nu poate fi văzută nici una din surse, ambele fiind *ocultate* de obiect*;*

Din punctele *aflate într-unul din conurile de umbră atenuată* se poate vedea doar *una* din surse, cealaltă fiind *ocultată* de obiect.

Să mai analizăm un aspect: în figura 1.17, distanța dintre surse este *mai mare decât diametrul* corpului luminat; ne dăm seama uşor că, dacă distanța dintre surse scade, conul de umbră este tot mai lung. Dacă distanța dintre cele două surse este *egal*ă *cu diametrul* corpului, atunci generatoarele conului de umbră devin paralele, iar conul de umbră se alungeşte la nesfârşit, transformându-se într-un *cilindru de umbră*. În sfârşit, dacă distanța dintre surse este *mai mică decât diametrul* corpului, conul de umbră devine *divergent*, astfel încât umbra se va obține, înconjurată de penumbră, la orice distanță de corp, în partea opusă surselor.

Cititorul poate analiza singur, pe baza aceloraşi principii geometrice simple, multe alte situații în care intervin surse punctuale: cazul a mai mult de două surse, cazuri în care sursele nu se află toate la aceeaşi distanţă de obiect, cazuri în care sursele nu au toate aceeaşi intensitate luminoasă etc..

b. Penumbra

Ce se întâmplă dacă avem - din nou - o singură sursă, dar aceasta nu este punctiformă? Întrebarea noastră este justificată de faptul că, într-adevăr, în multe cazuri, nu mai putem face abstracţie de dimensiunile surselor luminoase (de exemplu, în cazul tuburilor fluorescente, în cazul Soarelui etc.).

Vom căuta să reducem cazul surselor cu dimensiuni apreciabile la cazul producerii umbrelor prin iluminarea cu surse punctuale, considerând că orice punct de pe suprafaţa sursei date se comportă ca o sursă punctuală independentă.

Evident, nu putem construi conurile de umbră atenuată ale tuturor punctelor sursei, acestea fiind în număr infinit; vom căuta numai să delimităm zona din spaţiu unde nu poate ajunge nici o rază luminoasă, precum şi zona în care pot ajunge unele, dar nu toate razele luminoase pornite din punctele sursei. Prima din aceste zone este zona de umbră a corpului, iar cea de a doua se mai numeşte "*zona de penumbră*".

Vom analiza cazul cel mai simplu, al unui corp opac sferic luminat de o sursă sferică; în practică, acesta este cazul planetelor şi al sateliţilor din sistemul solar, care primesc lumina de la Soare. Cu gândul la aceste corpuri, vom lua sursa mai mare decât obiectul opac, Soarele fiind mult mai mare decât orice alt corp din sistemul solar. Reprezentăm mersul razelor de lumină doar într-un plan oarecare ce trece prin centrele celor două sfere (fig. 1.18 şi 1.19); evident, în oricare din aceste plane situaţia este aceeaşi.

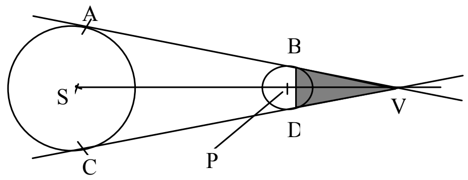


Figura 1. 18

Să căutăm, mai întâi, conul de umbră al corpului; pentru aceasta, "mergem" pe axa centrelor (dreapta SP), de la punctul P, spre partea opusă lui S. Primele puncte prin care "trecem" nu primesc nici o rază de lumină din vreun punct al sursei; ultimul punct în care nu ajunge nici o rază de lumină este punctul V, în care se întâlnesc tangentele comune "exterioare" (AB şi CD) ale celor două sfere. Mai mult, după ce trasăm aceste tangente, putem verifica uşor că în nici un punct al "domeniului" VBD nu poate pătrunde nici o rază de lumină! Am găsit secţiunea axială a conului de umbră (triunghiul VBD).

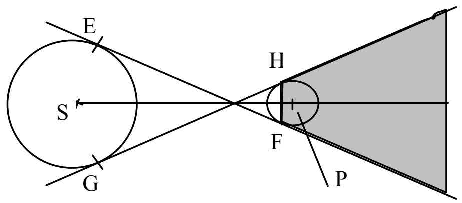
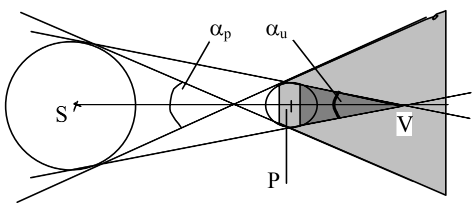


Figura 1. 19

Pentru a localiza penumbra, vom proceda oarecum "indirect": căutăm să delimităm zonele formate din puncte în care iluminarea nu este diminuată deloc, adică din puncte în care *pot ajunge* raze luminoase provenite de oriunde de pe sursă. Evident, o astfel de zonă trebuie să cuprindă întreaga sursă, dar să nu includă nici o porțiune din corpul opac.

O astfel de împărțire a planului figurii (fig. 1.19) se poate face printr-o dreaptă care să fie tangentă la ambele corpuri, dar să lase sursa de o parte, iar corpul opac de cealaltă parte a ei; este vorba, evident, de fiecare din tangentele comune "interioare" ale celor două corpuri (EF și GH). Porțiunea hașurată din fig. 1.19 reprezintă, deci, secțiunea axială a conului de penumbră; se verifică imediat (grafic) că, pentru orice punct din această zonă, există raze luminoase care nu pot "pătrunde" până acolo.

Reunind cele două reprezentări, obținem, în figura 1.20, imaginea conurilor de umbră și de penumbră în cazul unei surse luminoase sferice și a unui corp opac sferic.



SP = d PV = l_u

Figura 1. 20

Se poate remarca faptul că, pentru două corpuri date (unul luminos și celălalt opac), configurația conurilor este mereu aceeași, nedepinzând de distanța dintre corpuri. Distanța dintre corpuri influențează doar gradul de "alungire" al conurilor, adică unghiurile din vârfurile conurilor de umbră și de penumbră. Cititorul poate verifica singur aceasta, păstrând constante dimensiunile corpurilor și luând diferite distanțe între sursă și obiect.

Relațiile care există între razele R_s și R_c ale celor două corpuri (Soare și obiect), distanța dintre centre și caracteristicile conurilor de umbră și penumbră se pot deduce pe baza triunghiurilor din figura 1.20. Cu notațiile din această figură, se obțin imediat: *lungimea conului de umbră* (l_u), *unghiul conului de umbră* (α_u) și *unghiul conului de penumbră* (α_p):

$$l_u = \frac{d \cdot R_c}{R_s - R_c} \quad ; \qquad \sin\frac{\alpha_u}{2} = \frac{R_c}{l_u} \quad ; \qquad \sin\frac{\alpha_p}{2} = \frac{R_s + R_c}{d} \qquad (1.26)$$

Probleme

Problema 1.2.3. Să se determine terminatorul unui obiect sferic luminat de două surse punctuale identice, aflate la distanțe egale de obiect.

Problema 1.2.4. În ce condiții terminatorul unui obiect nu există?

Problema 1.2.5. Să se construiască conurile de umbră şi de penumbră ale unui obiect sferic de rază mai mare decât a sursei (sferice) care îl luminează.

Problema 1.2.6. Să se demonstreze relațiile (1.26).

1.2.3 Observarea unui obiect opac luminat integral

Înainte de a exploata, din punctul de vedere al unui observator, subiectele tratate în cele două secțiuni precedente, vom lua în considerare situația în care obiectele observate sunt integral luminate*, datorită mai multor surse luminoase* primare sau secundare.

Este tocmai ceea ce se întâmplă în timpul zilei, când lumina solară este difuzată de atmosferă şi reflectată puternic de obiecte în toate direcțiile, sau seara, în încăperile bine luminate.

a. Raza de lumină şi raza vizuală

Reamintim că traiectoria luminii, de la sursă până la un punct oarecare, se numeşte *rază de lumină* sau *rază luminoasă*; într-un mediu omogen și izotrop, razele de lumină sunt nişte *semidrepte*.

De aceea, studiul percepției vizuale este - în primă instanță - ... simplă geometrie, o geometrie a vederii, evident, dar o geometrie, deoarece se va referi la puncte, drepte, semidrepte şi alte entități geometrice.

Mai reamintim că vom numi *raze vizuale* acele raze de lumină care ajung în ochiul unui observator .

Putem foarte bine considera că raza vizuală este o semidreaptă care pleacă din ochiul observatorului; acest lucru nu va modifica prin nimic raționamentele pe care le vom dezvolta. Dar acest nou punct de vedere ne ajută să înțelegem că, implicit, ochiul nostru *proiectează* toate obiectele pe un "fundal" al vederii; acest fundal este alcătuit din cele mai îndepărtate obiecte vizibile (pereții încăperii în care ne aflăm, "peisajul" înconjurător etc.). În plus, pentru rațiuni care derivă din modalitatea de "focalizare" a imaginilor pe retina ochiului, acest "fundal" este perceput ca un *domeniu plan*, perpendicular pe direcția axei optice a ochiului; în consecință,

> Razele vizuale realizează *proiecția centrală* a obiectelor pe un plan perpendicular pe direcția de vizare, numit *"planul vederii"*.

Evident, planul vederii depinde de direcția în care privim. El nu are, deci, o poziție fixă, unică; putem spune că planul vederii se deplasează odată cu deplasarea direcției de vizare a ochiului.

b. Distanța unghiulară; puterea de separație a ochiului

Se numeşte *distanță unghiulară* dintre două puncte măsura unghiului format de razele vizuale ale punctelor respective (fig. 1.21).

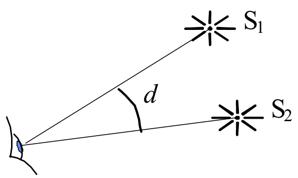


Figura 1. 21

În astronomie, vorbim de multe ori despre "distanța unghiulară dintre doi aştri". Deşi pare să ne ofere o informație săracă, această mărime nu este de neglijat deoarece, deseori, adăugată altor informații, permite obținerea de date foarte importante.

Distanța unghiulară dintre două puncte depinde în mod esențial de poziția observatorului; între aceleaşi două puncte, privite din locuri diferite, putem avea distanțe unghiulare foarte diferite. Evident, dacă ne aflăm la o distanță mult mai mare decât cea dintre ele, cele două puncte se vor afla, pentru noi, la o distanță unghiulară mică.

Puterea de separație sau "de rezoluție" a ochiului uman este de **aproximativ 1'**, adică ochiul percepe *distinct* două puncte numai dacă ele se află la o distanță unghiulară mai mare de 1' una de alta; în caz contrar, punctele sunt percepute ca unul singur.

c. Conturul unui obiect; limbul; diametrul unghiular

Conturul real al unui obiect este locul geometric al punctelor de tangență dintre razele vizuale ale unui observator şi obiectul respectiv. *Conturul aparent* este proiecția centrală a conturului real pe planul (fundalul) vederii. Forma conturului unui obiect depinde nu numai de forma obiectului respectiv, ci şi de *poziția relativă a obiectului în raport cu observatorul*.

Este evident faptul că deplasarea observatorului în raport cu obiectul duce la modificarea conturului observat. Simpla rotire "pe loc" a unui obiect va schimba conturul pe care acesta-l prezintă unui observator. Totuşi, există corpuri al căror contur nu se schimbă în urma unei *anumite* rotații sau chiar în urma *nici unei* rotații: ele sunt corpurile *rotunde*, sau *de revoluție*; sfera este singurul corp care prezintă în toate direcțiile acelaşi contur, un cerc.

Aceste cazuri "particulare" sunt foarte importante în astronomie, deoarece foarte multe din corpurile cosmice accesibile nouă au o formă apropiată de cea sferică. De altfel, în astronomie se utilizează un termen specific pentru conturul circular al unui astru - acest contur se mai numeşte "*limb*"; limbul Soarelui şi limbul Lunii sunt vizibile cu ochiul liber, iar limburile planetelor mari sunt vizibile prin lunete sau telescoape.

Aflați la mare distanță de un obiect, putem măsura doar o mărime care, la prima vedere, nu ne spune "mare lucru" despre dimensiunile reale ale obiectului respectiv: este vorba de "mărimea *unghiulară*" a acestuia, care este măsura unghiului format de razele vizuale provenite de la extremitățile conturului obiectului respectiv.

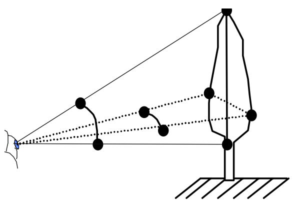


Figura 1. 22

Dacă obiectul privit nu este sferic, el va avea mărimi unghiulare diferite pe direcții diferite; de exemplu, plopul din figura 1.22 prezintă observatorului o mărime unghiulară "verticală" mai mare decât mărimea unghiulară "orizontală". În cazul obiectelor sferice, mărimea unghiulară este aceeaşi "pe toate direcțiile" şi putem vorbi despre "diametrul unghiular" al obiectului respectiv.

În astronomie, vorbim în mod curent despre "diametrul unghiular" al unui astru (Soare, Lună sau planetă); evident, condiția ca noi să percepem limbul unui astru este aceea ca diametrul său unghiular să fie mai mare decât puterea de separație a ochiului. În caz contrar, se spune că astrul prezintă un "aspect stelar"; această denumire este justificată de faptul că distanța până la stele este atât de mare încât nici un instrument optic nu ne poate înfățişa limbul unei stele. În acest sens, spunem că toate stelele se văd - cu orice instrument - ca nişte "puncte"; de fapt, în funcție de instrument, imaginea efectiv observată a unei stele este mai complicată, datorită fenomenului de "difracție a luminii", dar eventualul disc care se observă în anumite condiții nu are nici o legătură cu limbul stelei, fiind un efect instrumental.

Evident, dacă se cunoaşte distanţa până la un astru, precum şi diametrul unghiular al acestuia, se poate afla raza, respectiv diametrul "liniar" al astrului respectiv.

Ochiul (singur) nu poate determina un diametru unghiular sau o distanţă unghiulară. Dar, în anumite condiţii, el poate "compara" două astfel de mărimi; de exemplu, el ne arată că diametrul unghiular al Soarelui este "cam" la fel de mare ca acela al Lunii (într-adevăr, ambele au diametrul unghiular de aproximativ 30').

Să mai reţinem că, atunci când spunem "obiectul A *pare* (se vede) *mai mic* decât obiectul B", exprimăm faptul că "*mărimea unghiulară a obiectului* A *este mai mică decât mărimea unghiulară a obiectului* B".

d. Perspectiva

Dacă un obiect se depărtează de observator prin translaţie, adică rămânând paralel cu poziţia iniţială, *mărimea sa unghiulară devine mai mică*.

Cititorul cunoaşte, desigur, acest efect, a cărui utilizare a devenit "reflexă"; afirmaţia de mai sus constituie justificarea matematică a fenomenului. Mai mult, putem trage concluzia că un obiect poate ajunge să aibă o mărime unghiulară oricât de mică, *dacă este observat de la o distanţă suficient de mare*.

Pe de altă parte, dacă mărimea unghiulară a obiectului devine mai mică decât puterea de separare a ochiului, obiectul va fi perceput ca ... *un punct*.

Se ştie că *distanţa dintre două drepte paralele este aceeaşi "peste tot"*. Ce se întâmplă, însă, dacă "urmărim" cu privirea două drepte paralele?

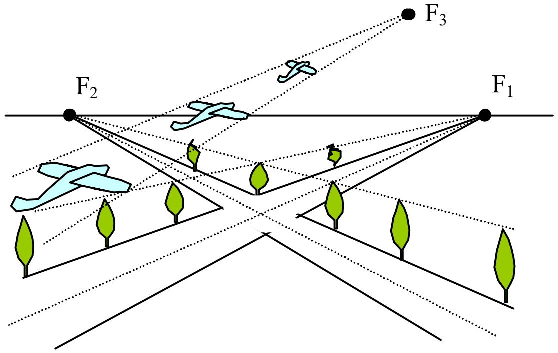


Figura 1. 23

Mai întâi, este evident că privirea va cuprinde puncte ale celor două drepte aflate la distanţe *din ce în ce mai mari de noi*; în consecinţă, distanţa dintre paralele *pare* din ce în ce mai mică (fig. 1.23), tinzând să devină *nulă* undeva ... "foarte departe"! Cu alte cuvinte, deşi paralele nu au nici un punct comun, ele *par a se întâlni* într-un punct foarte depărtat de privitor.

Punctul de întâlnire *aparentă* a două drepte paralele se numeşte *punct de fugă*. Bineînţeles, punctul de fugă este mai departe decât orice obiect concret din direcţia respectivă. Cele mai multe drepte paralele cu care ne întâlnim în practică se află în planul orizontal (margini de şosele, căi ferate etc.) sau sunt paralele cu planul orizontal (dreptele după care se "aliniază" vârfurile copacilor, acoperişurile caselor etc.). Din acest motiv, multe puncte de fugă se află pe *orizontul locului*; totuşi, ne putem imagina uşor drepte paralele al căror punct de fugă nu este pe orizont, ci în altă zonă a cerului (fig. 1.23). Două plane paralele sunt văzute şi ele, de un observator oarecare, ca şi cum s-ar întâlni după o *linie de fugă*; în particular, toate planele paralele cu planul orizontal al unui loc par a se întâlni de-a-lungul orizontului, care este, aşadar, linia de fugă a planelor respective.

Înţelegerea acestor caracteristici geometrice ale vederii noastre a dus la apariţia *perspectivei*, ca o modalitate de reprezentare a realităţii în desen şi pictură; acele desene şi picturi care reprezintă peisaje "în perspectivă" utilizează puncte de fugă pentru toate dreptele paralele care intervin în peisajul respectiv. Efectul este o asemănare deosebit de puternică a tabloului cu realitatea "aşa cum este văzută cu ochii".

Dar "perspectiva" nu aparţine exclusiv artelor plastice; în particular, în astronomie perspectiva are efecte de mare importanţă, pe care le vom discuta într-un alt capitol.

Probleme

Problema 1.2.7. În ce situaţii două puncte, aflate la mare distanţă unul de altul, sunt văzute la distanţă unghiulară foarte mică de un observator?

Problema 1.2.8. În ce situaţii două puncte, aflate la distanţă mică unul de altul, sunt văzute la distanţă unghiulară mare de un observator?

1.2.4 Perceperea unui obiect luminat de o singură sursă

În subcapitolul 1.2.3, deoarece obiectul era luminat din "toate părţile", în discuţia privind aspectul aparent (perceput de observator) al obiectului nu avea de ce să intervină vreo referire la poziţia surselor.

În cele ce urmează, deoarece ne propunem să discutăm modul în care este perceput un obiect luminat de *o singură* sursă, va trebui să luăm în considerare trei elemente de bază: *obiectul luminat*, *sursa de lumină* şi *observatorul*. Evident, ne preocupă obiectele şi sursele *cosmice* de lumină; de aceea, vom considera doar cazul cel mai frecvent în astronomie - al obiectelor sferice - şi vom presupune, în general, că dimensiunile sursei sunt neglijabile, deci că ea este "punctuală".

Existența unei singure surse de lumină face ca, în general, o parte a limbului relativ la un observator dat să se afle în umbra proprie a corpului. În această situație, observatorul va putea percepe doar o parte a suprafeței obiectului, cuprinsă între limbul luminat şi terminator.

a. Geometria terminatorului aparent

Ştim, din subcapitolele precedente, că atât conturul cât şi terminatorul unui obiect sferic sunt nişte cercuri de pe suprafața obiectului; dacă, în plus, distanțele sursă-obiect şi obiect-observator sunt foarte mari în raport cu raza obiectului, putem considera, pentru simplificarea prezentării, că cercurile respective sunt cercuri "mari" ale sferei, deci au razele egale cu raza sferei, iar planele lor trec prin centrul acesteia.

S-a mai demonstrat că planul terminatorului este perpendicular pe direcția sursă-obiect, iar planul conturului (limbului) este perpendicular pe direcția observator-obiect.

Prin urmare, limbul astrului se află în planul vederii; nu acelaşi lucru se întâmplă cu terminatorul real, al cărui plan diferă de planul vederii (fig. 1.24), fiind orientat spre sursă, nu spre observator.

Observatorul proiectează totul, după cum ştim, pe planul (fundalul) vederii; prin urmare, el proiectează terminatorul real al obiectului pe planul limbului, percepând obiectul ca fiind delimitat, într-o parte, de limbul "luminat", iar în cealaltă parte de terminatorul *aparent*, care este proiecția terminatorului real pe planul vederii.

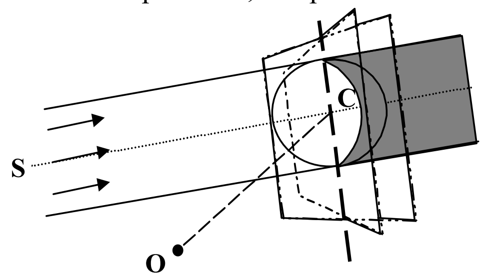


Figura 1. 24

Figura 1.25 prezintă aspectul aparent al obiectului aflat în "configurația" din figura precedentă, 1.24. Evident, recunoaştem "*secera Lunii*"; dar nu numai Luna poate prezenta un astfel de aspect, ci şi planetele (bineînțeles, dacă sunt privite printr-o lunetă sau printr-un telescop). Pentru a putea defini corect aspectul observat al obiectului sferic luminat de o singură sursă, va trebui să studiem geometria terminatorului aparent.

Acesta rezultă din proiecția (centrală) a terminatorului real (circular) pe planul vederii; deoarece distanța observator-obiect este, în astronomie, mult mai mare decât raza obiectului, putem simplifica situația - fără alterări sensibile - considerând că proiecția centrală este "practic" una *ortogonală*. Analiza noastră se va desfăşura în continuare, deci, considerând că terminatorul aparent este proiecția ortogonală a terminatorului real pe planul limbului (adică pe planul vederii).

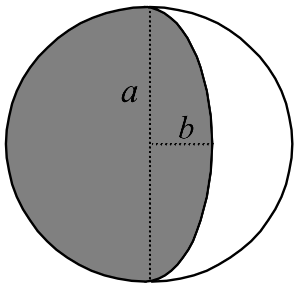


Figura 1. 25

b. Elipsa

Numim ELIPSĂ proiecția ortogonală a unui cerc pe un plan. Pornind de la această definiție, studiul elipsei este mult mai ancorat în domeniul faptelor științifice în care ea intervine şi, pe de altă parte, este mai rapid şi eficient decât permit alte definiții ale ei.

Deoarece proiecția depinde doar de orientarea planului-suport, vom considera un plan care trece prin centrul cercului (fig. 1.26). De la început se vede că elipsa are o direcție "privilegiată": este vorba de dreapta de intersecție a planului elipsei cu planul cercului originar. Punctele cercului, aflate pe această dreaptă sunt şi puncte ale elipsei; mai mult, ele se află la distanța maximă de centrul comun de simetrie, deoarece nici o altă rază a cercului nu se află în planul elipsei şi, prin urmare, proiecția nici unei alte raze nu poate fi egală cu ea însăşi. Prin urmare, segmentul determinat de aceste două puncte se va numi "*axa mare*" a elipsei.

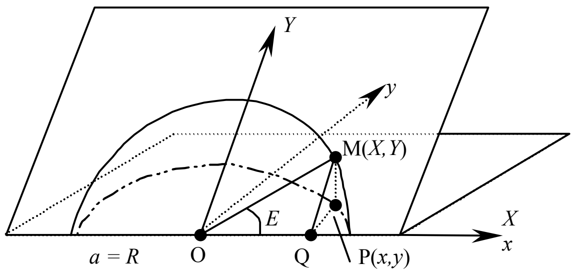


Figura 1. 26

Pentru a întreprinde un studiu analitic al elipsei, este natural să alegem ca origine a sistemelor de referință centrul comun de simetrie, iar ca axă a absciselor (Ox) suportul axei mari a elipsei. Ca axă a ordonatelor vom alege normala la Ox, în fiecare din cele două plane; fie acestea *OY* pentru planul cercului şi *Oy* pentru planul elipsei.

Vom nota cu β măsura unghiului dintre cele două plane, cu R raza cercului şi cu E *unghiul de orientare* al razei corespunzătoare unui punct (curent) de pe cercul originar (fig. 1.26). Cu aceste notaţii, utilizând formulele proiecţiei ortogonale, rezultă imediat relaţiile:

$$X = R\cdot\cos E \qquad x = X \qquad x = R\cdot\cos E$$
$$Y = R\cdot\sin E \qquad y = Y\cdot\cos\beta \qquad y = (R\cdot\sin E)\cdot\cos\beta$$

de unde, notând:

$$R = a \quad , \quad R\cdot\cos\beta = b \ ,$$

se obţin ecuaţiile parametrice ale elipsei în planul ei, faţă de sistemul având originea în centru şi ca axă a absciselor axa mare a elipsei:

$$\begin{aligned} x &= a\cdot\cos E \\ y &= b\cdot\sin E \end{aligned} \tag{1.27}$$

Evident, toate proprietăţile elipsei se pot deduce pe cale analitică, din ecuaţiile ei parametrice. Vom menţiona, pe scurt, doar câteva dintre acestea.

Valoarea maximă a abscisei unui punct de pe elipsă este a, iar valoarea maximă a ordonatei este b; spre deosebire de cerc, care este caracterizat printr-un singur parametru (raza), elipsa este caracterizată - deci complet determinată - de parametrii a şi b, numiţi *semiaxa mare*, respectiv *semiaxa mică* a elipsei (fig. 1.27).

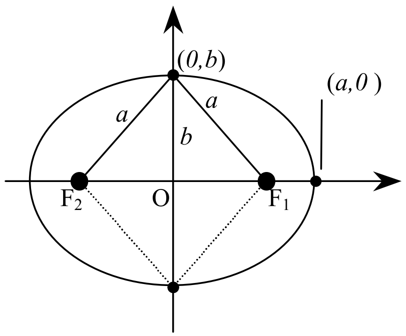


Figura 1. 27

Proprietăţile de simetrie faţă de cele două axe rezultă imediat din proprietăţile funcţiilor *sinus* şi *cosinus*, care apar în expresiile coordonatelor carteziene ale punctului curent de pe elipsă.

Trebuie să fie menţionat faptul că, dacă în cazul cercului variabila E avea o semnificaţie geometrică intuitivă simplă (unghiul de orientare al razei curente, faţă de un diametru de referinţă), în cazul elipsei această semnificaţie simplă nu mai există. Va trebui să considerăm această variabilă, pur şi simplu, ca fiind o mărime auxiliară care, variind între 0° şi 360°, generează toate poziţiile punctelor de pe elipsă, prin intermediul ecuaţiilor parametrice (1.27).

Totuşi, semnificaţia iniţială - mai complicată - a variabilei E , ca şi aspectul ecuaţiilor (1.27), ne fac să găsim destul de uşor o utilitate intuitivă acestei variabile. Într-adevăr, prima ecuaţie ne sugerează x-ul unui punct de pe cercul de rază a, dar a doua ecuaţie ne arată y-ul unui punct de pe cercul de rază b, ambele corespunzând unei raze cu unghiul de orientare E (fig. 1.28).

De aici rezultă un procedeu simplu şi eficient de construcţie a elipsei, "*prin puncte*":

se vor lua două cercuri concentrice, de raze a şi b (fig. 1.29); pentru a obţine punctul elipsei care corespunde unei anumite valori a lui E, ducem din centru semidreapta care face unghiul respectiv cu axa Ox;

obţinem cele două puncte de intersecţie cu cercurile, iar apoi, prin paralele duse la axe, construim punctul de pe elipsă, luând abscisa punctului de pe cercul mare şi ordonata punctului de pe cercul mic.

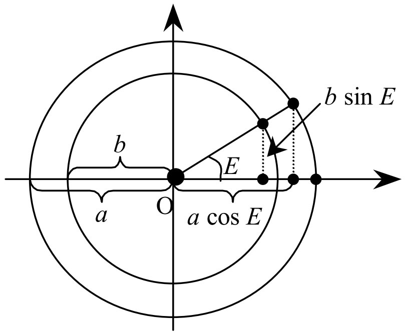


Figura 1. 28

Evident, putem construi oricâte astfel de puncte dorim. Dat fiind rolul acestor cercuri în "geneza" elipsei, cercul de rază a este numit *cercul principal*, iar cel de rază b este numit *cercul secundar* al elipsei.

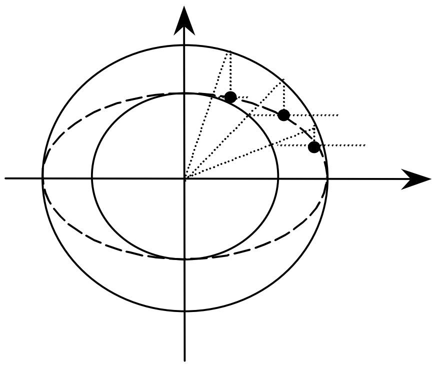


Figura 1. 29

Probleme:

Problema 1.2.9. Să se deducă, din ecuaţiile parametrice, ecuaţia implicită a elipsei.

Problema 1.2.10. Se definesc "*focarele*" elipsei ca fiind punctele de pe axa mare a acesteia, care se află la distanţa a de vârfurile semiaxei *mici* (fig.1.27). Să se demonstreze *proprietatea de loc geometric* al elipsei: "*suma distanţelor de la orice punct al elipsei la cele două focare este constantă*"; să se găsească şi valoarea acestei constante.

Problema 1.2.11. Numim "raze vectoare" segmentele care unesc focarele cu un punct al elipsei. Să se demonstreze "*proprietatea optică*" a elipsei: *normala* *elipsei într-un punct oarecare al ei este bisectoarea unghiului format de razele vectoare duse în acel punct.*

Fără cele de mai sus, simpla *desenare* corectă a "secerii" Lunii nu este, desigur, posibilă; dar, ceea ce este mult mai important, cunoaşterea geometriei terminatorului aparent ne permite să deducem, imediat, câteva date privind configurarea în spaţiu a triunghiului Soare-Lună-observator sau a unui triunghi Soare-planetă-observator.

Mai întâi, o informaţie "oferită" de simpla orientarea pe cer a secerii lunare; mai precis, ea este oferită de axa mare a terminatorului aparent (fig. 1.25). Această axă este inclusă, evident, în planul limbului, dar şi în planul terminatorului real al Lunii.

Prin urmare, ea este perpendiculară (în L, fig. 1.30) atât pe direcţia Lună-observator, (LO, fig. 1.30) cât şi pe direcţia Lună-Soare (LS, fig. 1.30). Fiind perpendiculară pe două drepte din planul Soare-Lună-observator (SLO), axa mare a terminatorului real este perpendiculară pe acest plan. Inversând relaţia, rezultă că planul Soare-Lună-observator este perpendicular pe axa mare a terminatorului aparent.

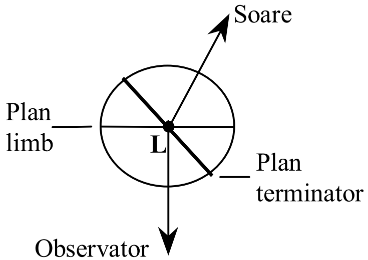


Figura 1. 30

Orice dreaptă ce trece prin centrul Lunii şi este perpendiculară pe axa mare a terminatorului aparent va fi inclusă în planul amintit; noi putem duce oricând, în planul vederii, o astfel de dreaptă. Această dreaptă va defini în spaţiu, împreună cu direcţia observator-Lună, întreg planul Soare-Lună-observator (fig. 1.30). Semidreapta ei, orientată spre limbul luminat, ne arată direcţia în care se află Soarele.

Dar semiaxele terminatorului aparent ne oferă o informaţie şi mai consistentă. Din geometria elipsei se ştie că $b = a \cdot \cos \beta$, β fiind unghiul dintre planul terminatorului real şi cel al planului vederii (limbului); acesta este, însă, egal cu unghiul format de direcţiile Lună-observator şi Lună-Soare, direcţiile respective fiind chiar normalele planelor amintite.

Unghiul β poate fi determinat imediat ($\cos \beta = b / a$), dacă măsurăm (pe orice imagine) cele două semiaxe ale terminatorului aparent; evident, nu are importanță unitatea de măsură.

Prin urmare, simpla măsurare a axelor terminatorului aparent al obiectului sferic luminat permite determinarea unuia din unghiurile triunghiului sursă-obiect-observator, şi anume al celui cu vârful în obiect; dar, în principiu, observatorul trebuie să poată măsura direct încă un unghi al aceluiaşi triunghi, cel cu vârful în observator.

Având două unghiuri cunoscute, triunghiul sursă-obiect-observator este complet determinat, abstracție făcând de un factor de scară pentru laturile sale. Dacă măcar una din laturile triunghiului respectiv este cunoscută, şi celelalte două vor rezulta imediat. Aceasta este una din primele posibilități de determinare a distanțelor din sistemul nostru planetar.

c. Fazele unui obiect aflat în mişcare

Analiza de mai sus, privind aspectul aparent (observat) al unui obiect luminat de o singură sursă, a fost întreprinsă pentru situația în care cele trei corpuri erau fixe; dacă ele se află în mişcare, cele prezentate sunt valabile pentru un moment dat.

Orice mişcare a unuia dintre corpuri, dacă provoacă modificarea configurației tripletului, provoacă şi modificarea aspectului aparent al corpului luminat. Dacă măcar una din mişcări este continuă, atunci şi modificarea aspectului aparent este continuă.

Mişcările reale ale corpurilor implicate pot fi diverse, iar observatorul poate să nici nu fie conştient de unele dintre acestea. Mai mult, mişcări diferite pot avea acelaşi efect şi, prin urmare, observarea modificărilor aspectului aparent al corpului luminat nu poate stabili cu siguranță mişcările celor trei corpuri; din această observare se pot extrage doar *unele indicii* privind mişcările corpurilor respective. Vom reveni mai târziu asupra lor.

Cel mai cunoscut exemplu al acestui fenomen este, evident, cel al Lunii, dar cu o lunetă modestă se pot observa modificări ale formei aparente şi în cazul planetei Venus.

Faptul că Luna, deşi strălucitoare, îşi schimbă aspectul, ne demonstrează că ea nu posedă lumină "proprie" ci este luminată de un alt corp cosmic. Ori, Soarele fiind singurul astru mai strălucitor decât

Luna, se impune atenției ipoteza că Luna este luminată, ca şi Pământul, de către Soare. Această ipoteză este întărită de corelația care există între aspectul Lunii şi poziția sa aparentă pe cer, în raport cu Soarele. De asemenea, de faptul că limbul luminos al Lunii este îndreptat, întotdeauna, spre Soare.

Trebuie, deci, să admitem că că *Luna are o formă sferică şi este luminată de Soare*.

Diferitele forme sub care se prezintă Luna unui observator terestru se numesc *faze*; deoarece, după un timp, fazele Lunii se repetă, se vorbeşte despre *ciclul fazelor Lunii*. Durata unui ciclu complet al fazelor Lunii, adică intervalul de timp dintre două faze consecutive de acelaşi fel se mai numeşte *lunație* sau *lună sinodică*; ea are 29 zile, 12 ore şi 44 minute. Evident, luna sinodică a stat la baza stabilirii lunii calendaristice ca unitate de timp intermediară între *zi* şi *an*.

Succesiunea fazelor lunare, în corelație cu deplasarea Lunii printre stelele "fixe", va fi prezentată în capitolul următor, care se ocupă cu observațiile astronomice care se pot efectua cu ochiul liber şi cu instrumentele pretelescopice.

Probleme

Problema 1.2.12. Figura 1.31 conține o eroare; care ?

Problema 1.2.13. Figura 1.32 conține o eroare; care ?

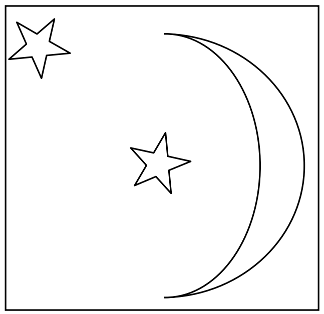


Figura 1. 31

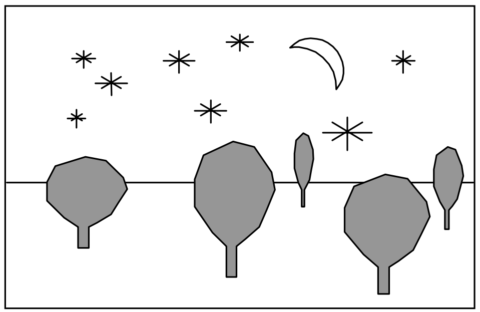


Figura 1. 32

1.2.5 Ocultații şi eclipse

a. Ocultații

Când am început să studiem geometria percepției vizuale, ne-am concentrat atenția asupra *unui* obiect observat; am definit planul vederii, limbul (conturul) real şi cel aparent al obiectului, terminatorul real şi cel aparent al acestuia. Să luăm acum în considerare cazul a două sau mai multe obiecte observate de acelaşi observator:
- dacă distanța unghiulară dintre obiectele respective este mare, se poate întâmpla ca observatorul să fie obligat să-şi "mute privirea" când la unul, când la altul dintre obiectele care-l interesează;
- dacă distanțele unghiulare sunt mai "rezonabile", observatorul poate "cuprinde" cu privirea toate obiectele respective;
- dacă distanța unghiulară dintre două obiecte devine "suficient de mică", contururile aparente ale celor două obiecte se pot intersecta şi obiectul mai apropiat poate împiedica (parțial sau total) vizibilitatea obiectului mai îndepărtat; de altfel, acesta este - de multe ori - *un mod de a ne da seama care din cele două obiecte este mai apropiat şi care este mai depărtat de noi*.

> Se numeşte OCULTAȚIE împiedicarea vizibilității unui obiect datorită interpunerii unui al doilea obiect între observator şi primul obiect.

"Ocultat" este, deci, sinonim cu "ascuns vederii". Se spune că primul obiect este "ocultat", sau că al doilea obiect îl "ocultează" pe primul.

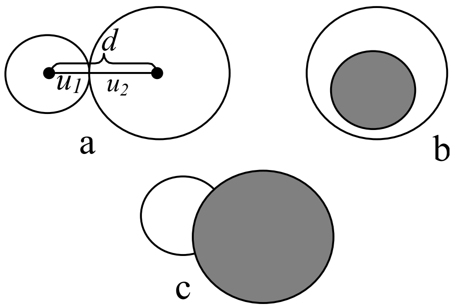


Figura 1. 33

Dacă ne referim la obiectele sferice, care sunt frecvent întâlnite în astronomie, este evident că, pentru a se produce o ocultație, este necesar ca distanța unghiulară dintre centrele corpurilor trebuie să devină mai mică decât suma razelor unghiulare ale celor două corpuri (fig. 33, a).

Ocultațiile pot fi "parțiale" sau "totale"; pentru ca o ocultație să fie totală, este necesar - în primul rând - ca diametrul unghiular al obiectului care ocultează să fie mai mare decât diametrul unghiular al celui ocultat. Bineînțeles, în plus, distanța dintre centrele aparente trebuie să fie "suficient de mică"; dacă nu, ocultația respectivă poate fi, totuşi, numai parțială (fig. 1.33, c). Dacă obiectul care ocultează are diametrul unghiular mai mic decât cel al obiectului ocultat, poate avea loc o ocultație "inelară" (fig. 1.33, b).

În astronomie există relativ multe situații în care se produc ocultații; Luna ocultează de multe ori diverse stele, planetele (privite prin telescop) ocultează frecvent unii din sateliții lor, ba chiar un satelit planetar poate oculta - mai rar - un alt satelit al aceleiaşi planete.

Tot în astronomie, ocultarea (inelară) a unui obiect de către unul mult mai mic este numită "trecere"; de exemplu, sunt rare - prin urmare, remarcabile - trecerile lui Mercur şi Venus peste discul Soarelui. De asemenea, sunt destul de frecvente trecerile sateliților lui Jupiter peste discul planetei.

Observarea ocultațiilor aduce de multe ori informații prețioase; de exemplu, trecerea lui Venus peste discul Soarelui a pus în evidență existența unei atmosfere dense în jurul acestei planete, ocultarea stelelor de către Lună arată, dimpotrivă, că Luna nu are atmosferă, ocultarea unei stele de către un asteroid poate permite determinarea diametrului acelui asteroid etc. Asupra unora dintre acestea vom mai reveni.

Dar, până la observarea unor ocultații "naturale", cititorul poate provoca el însuşi - oricând doreşte - diverse ocultații; de exemplu, putem oculta Luna cu orice obiect aflat la îndemână: cu o carte, cu prima falangă a degetului mare, cu o monedă. Ultimul obiect sugerează chiar o "metodă" de estimare a diametrului unghiular al Lunii: ocultăm Luna cu diferite monede, reținem moneda care produce ocultația cea mai "strânsă" şi, măsurând diametrul ei şi distanța la care am ținut-o în fața ochiului, putem calcula diametrul ei unghiular, care este egal cu diametrul unghiular al Lunii.

b. Eclipse

Producerea unei ocultaţii depinde - în mod esenţial - de poziţia observatorului; cu alte cuvinte, o ocultaţie poate avea loc *pentru un observator* şi - în acelaşi moment - ea poate să **nu** aibă loc *pentru un alt observator*.

Dar un obiect poate să devină invizibil şi din alt motiv: pur şi simplu, el poate să nu mai fie luminat de sursa căreia îi este expusă, datorită faptului că între sursă şi obiect se interpune un altul.

> Se numeşte ECLIPSĂ intrarea unui obiect în conul de umbră al altui corp; dacă are loc intrarea într-un con de penumbră, se spune - prin extensie - că se produce o "*eclipsă prin penumbră*".

Evident, şi eclipsele pot fi totale sau parţiale; dar, spre deosebire de o ocultaţie, o eclipsă poate fi văzută de către *orice* observator (fig. 34).

Este interesant să remarcăm că între eclipse şi ocultaţii există o legătură directă, obligatorie: *oricând se produce o eclipsă, de pe corpul eclipsat se poate constata* ocultarea *sursei de către obiectul a cărui umbră produce eclipsa*. Astfel, în momentul în care are loc o eclipsă de Lună, adică umbra Pământului "cade" pe Lună, din punctele de pe Lună care se află în această umbră se poate observa ocultarea Soarelui de către Pământ.

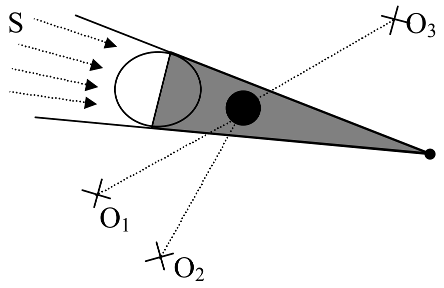


Figura 1. 34

În astronomie, eclipsele sunt de multe ori spectaculoase; dar, dincolo de spectacol, observarea eclipselor a adus oamenilor multe informaţii care, altfel, ar fi fost greu de obţinut. Astfel, forma circulară a umbrei în cazul eclipselor de Lună a arătat că forma Pământului trebuie să fie sferică; observarea sistematică a eclipselor sateliţilor lui Jupiter i-a permis, în secolul al XVII-lea, lui Olaf Roemer, să realizeze prima determinare a vitezei luminii.

c. Eclipsele de Lună şi de Soare; un abuz curent de limbaj

Fenomenele cereşti cele mai spectaculoase pe care le poate vedea un pământean - în afara cometelor şi a bolizilor - sunt, fără îndoială, eclipsele de Lună şi cele de Soare. Aici tradiția comite *un abuz de limbaj*, deoarece eclipsele de Soare sunt, de fapt, *ocultații* ale astrului zilei de către Lună.

După cum s-a arătat în paragraful precedent, orice eclipsă, deci şi cele de Lună, poate fi văzută de orice observator. O eclipsă de Lună începe prin intrarea acesteia în penumbra Pământului; dacă Luna trece suficient de aproape de axa conului de umbră al Pământului, eclipsa continuă cu intrarea - parțială, sau chiar totală - a Lunii în umbra Pământului (fig. 1.35).

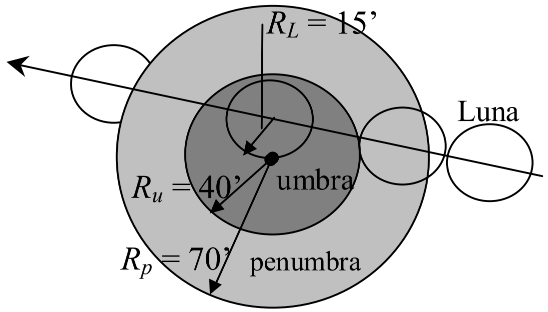


Figura 1. 35

Faptul că se produc eclipse de Lună arată că există o anumită relație între dimensiunile Soarelui, Pământului şi distanțele Soare-Pământ, respectiv Pământ-Lună; această relație rezultă din prima formulă (1.26), punând condiția ca lungimea conului de umbră al Pământului să fie mai mare decât distanța Pământ-Lună.

O relație similară se poate deduce şi în cazul eclipselor de Soare; într-adevăr, eclipsarea (de fapt, ocultarea) totală a Soarelui poate fi observată din punctele care sunt acoperite de umbra Lunii; producerea eclipselor de Soare arată că lungimea conului de umbră al Lunii este mai mare decât distanța de la Lună la suprafața Pământului.

Faptul că eclipsele *totale* de Soare nu pot fi văzute decât de pe zone foarte restrânse ale suprafeței Pământului arată că umbra Lunii pe Pământ este relativ mică (în jur de 100 km.). Mişcarea de rotație a Pământului, precum şi mişcarea Lunii pe orbita sa fac ca umbra să se deplaseze pe suprafaţa Pământului, ceea ce dă naştere unei "*benzi de totalitate*" (fig. 1.36).

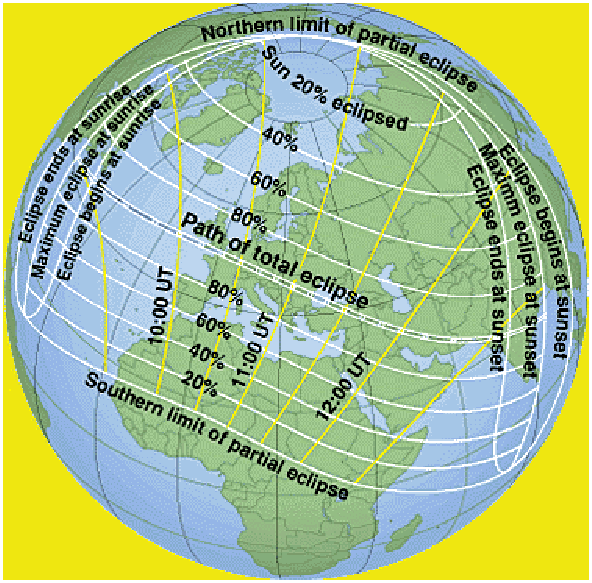


Figura 1.36: Banda de totalitate (drumul umbrei Lunii) şi cea de parţialitate (zona parcursă de penumbra Lunii), în cursul eclipsei totale de Soare din 11 august 1999 (predicţia NASA)

Faptul că eclipsele *totale* de Soare nu pot fi văzute decât de pe zone foarte restrânse ale suprafeţei Pământului arată că umbra Lunii pe Pământ este relativ mică (în jur de 100 km.). Mişcarea de rotaţie a Pământului, precum şi mişcarea Lunii pe orbita sa fac ca umbra să se deplaseze pe suprafaţa Pământului, ceea ce dă naştere unei "*benzi de totalitate*" (fig. 1.36).

Ceea ce i-a intrigat pe oameni în cazul eclipselor de Lună şi - în special - în cazul eclipselor de Soare a fost faptul că, cel puţin pentru un loc dat pe suprafaţa Pământului, eclipsele nu par să fie fenomene periodice, aşa cum sunt multe alte fenomene astronomice (răsăritul şi apusul aştrilor, fazele Lunii etc.). Vom discuta în altă parte această problemă, esenţială pentru înţelegerea lumii în care trăim.

Probleme

Problema 1.2.16. Procurându-vă elementele necesare din Anuarul Astronomic (sau din altă sursă), calculați lungimea conului de umbră al Pământului.

Problema 1.2.17. Analog, calculați lungimea conului de umbră al Lunii.

1.2.6 Efectul stereoscopic al vederii binoculare

a. Vederea binoculară

În tot ce am discutat până acum, referitor la percepția vizuală, am făcut referiri la ochiul uman, mai precis *la un singur ochi*; într-adevăr, pentru a constata cele întâlnite până acum nu avem nevoie decât de un singur ochi! Apare - în mod curios, dar totuşi natural - întrebarea: de ce avem doi ochi?

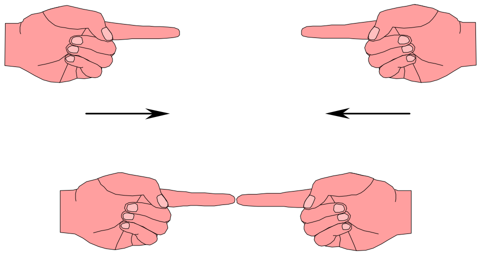


Figura 1. 37

Pentru a constata faptul că *nu orice acțiune făcută cu doi ochi poate fi făcută şi cu un singur ochi*, vă propunem următoarea experiență:
- întindeți ambele mâini înainte, cu degetele arătătoare îndreptate unul spre celălalt, la o distanță de 20 - 30 cm unul de altul (fig.1.37);
- îndoiți uşor coatele şi faceți două-trei mici mişcări cu brațele;
- apropiați încet cele două mâini una de alta, astfel încât degetele arătătoare să se întâlnească cu exactitate, "vârf în vârf".

Ați reuşit ? Aproape sigur, da. În continuare, **închideți un ochi** şi repetați experiența !

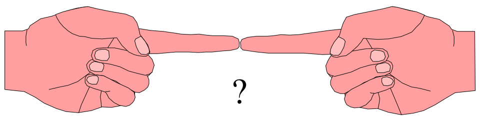


Figura 1. 38

Spre surprinderea noastră, în momentul în care vârfurile degetelor ar trebui să se atingă, constatăm că unul din ele se dovedeşte a fi puțin mai departe de noi decât celălalt şi degetele nu se mai ating "vârf în vârf" (fig.1.38).

Această experienţă simplă ne arată că *modul direct de apreciere a diferenţelor de distanţă* funcţionează doar dacă privim cu amândoi ochii; faptul pare curios, noi fiind obisnuiţi să credem că ambii ochi trimit la creier aceeaşi imagine, deci că fiecare în parte şi amândoi la un loc acţionează la fel.

Conform celor constatate în experienţa noastră, va trebui să reconsiderăm această idee şi să lămurim mai bine lucrurile.

În acest scop, nu avem decât să întindem o mână în faţa noastră cu degetul mare ridicat şi să privim la acest deget alternativ, când eu un ochi, când cu celălalt (fig. 1.39). Ce constatăm?

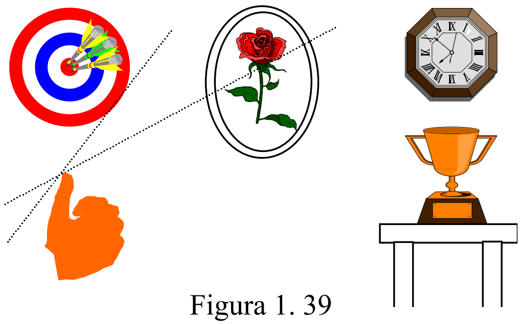


Figura 1. 39

Ciudat, degetul nostru efectuează nişte "salturi" mari la stânga şi la dreapta, fiind văzut când într-un loc când în altul pe fundalul obiectelor mai depărtate de noi (fig. 1.40).

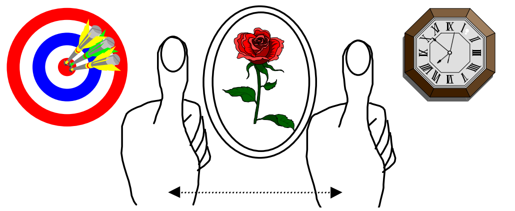


Figura 1. 40

b. Efectul stereoscopic

Ne dăm seama, astfel, că fiecare ochi "captează" o imagine care depinde de locul ochiului respectiv; prin urmare, cei doi ochi trimit la creier două imagini diferite. Suprapunerea celor două imagini permite realizarea "profunzimii" vederii noastre, adică permite aprecierea directă a diferenţelor de distanţe de la noi la obiectele înconjurătoare. Se spune că vederea cu doi ochi este în "relief" sau "*stereoscopică*".

Unghiul format de razele vizuale care pleacă din cei doi ochi la un acelaşi obiect se numeşte "*paralaxă oculară*"; evident, efectul stereoscopic al vederii binoculare se produce doar dacă paralaxa oculară este mai mare decât puterea de separare a vederii noastre. Or, paralaxa oculară scade, evident, odată cu creşterea distanței până la obiectul privit; de aici rezultă că vederea noastră este stereoscopică doar până la o distanță destul de limitată. Această distanță ar putea fi mai mare dacă am dispune de un sistem de creştere (?!) a distanței dintre ochi.

Lăsând gluma la o parte, să menționăm că înțelegerea efectului stereoscopic al vederii binoculare permite unele aplicații foarte interesante; de exemplu, dacă în loc de o fotografie a unui peisaj realizăm *două*, din poziții diferite, aflate la o distanță comparabilă cu distanța dintre ochi (5 - 10 cm), şi apoi privim cu fiecare ochi imaginea corespunzătoare, vom vedea o imagine "în relief". Aparatul - deosebit de simplu - care ne ajută să privim comod la cele două imagini se numeşte "*stereoscop*"; stereoscoape mai complicate permit *fotogrammetriştilor* să traseze curbele de nivel ale terenului, văzând "în relief" cuplurile de imagini realizate din avioane, din puncte diferite – dar relativ apropiate - ale traiectoriei lor de zbor.

c. Mecanismul indirect de apreciere a distanțelor

Efectul stereoscopic scade mult în cazul în care privim la obiecte foarte depărtate de noi, devenind, la un moment dat, imperceptibil. În aceste cazuri intră în funcțiune un mecanism uzual, *indirect*, de apreciere a diferențelor de distanță.

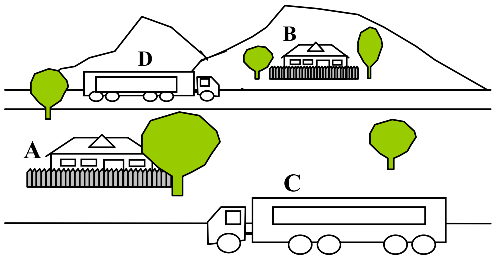


Figura 1. 41

De exemplu, cred că toată lumea e de acord că în figura 1.41 casa A este mai aproape de privitor decât casa B, camionul C este mai aproape decât camionul D etc..

Pe ce ne bazăm când suntem atât de siguri în aprecieri?

"Teoretic", pe faptul că mărimea aparentă (unghiulară) a unui obiect scade (pentru un observator) odată cu creşterea distanţei observator-obiect (v. relaţia (1.3)). "Practic", nici nu mai facem un raţionament explicit, ci ne bazăm pe experienţa îndelungată, acumulată de noi de când privim lumea.

Instinctiv, noi *ştim* că două case de acelaşi tip au *cam* aceeaşi înălţime, la fel şi două camioane etc.; mai ştim că orice obiect *pare cu atât mai mic cu cât este privit mai de departe*.

Inconştient, *reflex*, judecăm în felul următor:

în realitate, *cele două obiecte sunt la fel de mari*; aparent, noi îl vedem pe unul "mai mic" decât pe celălalt; evident, *cel care pare mai mic este cel mai depărtat de noi*.

Reţinem din cele de mai sus că *procedeul indirect* de apreciere a diferenţelor de distanţă se bazează, în mod esenţial, pe *cunoaşterea mărimii reale a obiectelor privite*, cunoaştere pe care de regulă o avem, fiindcă obiectele privite ne sunt familiare, chiar dacă ele se află la mare distanţă de noi.

1.2.7 Cerul, o iluzie mereu actuală

a. Cazul obiectelor cosmice; sfera cerească

Lucrurile se schimbă complet când este vorba de obiecte din afara Pământului; obiectele cosmice nu ne sunt familiare de loc, dat fiind că experienţa cotidiană nu ne furnizează date asupra naturii, stării sau dimensiunilor relative ale acestora.

Simţurile noastre sunt dezarmate, nu putem aprecia cu ele nici direct, nici indirect, care obiecte cosmice sunt mai apropiate de noi şi care sunt mai depărtate. Excepţia de la această regulă o constituie ocultaţiile astronomice, dar ele sunt relativ rare şi nu întotdeauna uşor de interpretat; de exemplu, când Soarele este ocultat de Lună ("eclipsa" de Soare!), Luna însăşi nu este vizibilă, şi a trebuit să se cunoască bine mişcarea Lunii pentru a se putea formula "ipoteza" că Luna este cea care produce fenomenul.

Dezorientată în faţa mulţimii de obiecte cosmice - inaccesibile şi de natură necunoscută - pe care le percepe, vederea ne face să credem că toate acestea se află la aceeaşi distanţă de noi, observatorii lor. Nu putem aprecia decât că această distanţă este "foarte mare" sau chiar "cea mai mare".

Senzaţia că toţi aştrii se află la aceeaşi distanţă de observator este atât de categorică încât ea duce, involuntar, la impresia că aştrii sunt fixaţi pe o sferă imensă, al cărei centru se află chiar în locul de observare; această sferă se numeşte *sferă cerească*, iar partea ei care se află deasupra orizontului se numeste *cer* (fig. 1.42).

Este important să subliniem că observatorul are impresia că el se găseşte întotdeauna *în centrul* sferei cereşti; acest lucru este valabil pentru orice observator, *fie că se află la poli, la ecuator, oriunde pe Pământ, pe Lună sau pe o planetă oarecare*.

Această iluzie a simţurilor noastre a contribuit, fără îndoială la "fixarea" Pământului în centrul lumii de către oamenii din vechime. Dar despre această problemă vom discuta mai târziu. Deocamdată reţinem, în concluzia celor de mai sus, că:

SFERA CEREASCĂ este o sferă imaginară, de rază nedeterminată, cu centrul în locul de observare al Universului; datorită limitelor organelor noastre de percepere a lumii, noi "transportăm" (proiectăm) fiecare corp cosmic de-a lungul razei vizuale, "ducându-l" pe sfera cerească (fig. 1.42).

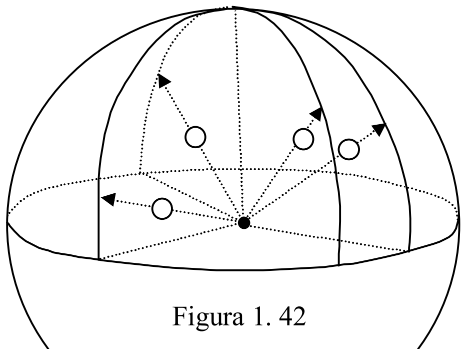


Figura 1. 42

Cunoaşterea sferei cereşti, *aşa cum se înfăţişează ea simţurilor noastre* a fost o etapă importantă, absolut necesară în strădania oamenilor de a descoperi structura reală a Universului, în efortul lor de a trece *de la aparenţă la realitate* în cunoaşterea lumii.

Abia după mii de ani de contemplare a cerului, oamenii au descoperit că acesta, obiectul admiraţiei atâtor generaţii, de fapt ... nu există! Noi ştim astăzi că aştrii care par "atârnaţi" pe minunata boltă cerească se află, în realitate, la distanţe foarte diferite de noi: Luna la 380.000 km, Soarele la 150.000.000 km, cea mai apropiată stea, la 4,25 ani-lumină, cea mai apropiată galaxie la 2.000.000 ani-lumină[1] etc..

Ei bine, cu toate că *ştim* aceste lucruri, atunci când ridicăm ochii *vedem* cerul ca şi oamenii din vechime, care nu aveau cunoştinţe despre alcătuirea reală a Universului; vederea ne arată şi nouă, ca şi lor, că toţi aştrii sunt pe cer, adică pe o imensă cupolă care ne înconjoară. Fără îndoială, *sfera cerească este o iluzie mereu actuală*!

b. Constelaţii şi stele

"Aspectul cerului" reprezintă proiecţia centrală a Universului accesibil unui observator, pe sfera cerească a acestuia.

Dacă urmărim aspectul cerului în cursul unei nopţi, constatăm că, încet-încet, acest aspect se schimbă: unele stele apun, altele răsar, unele "coboară", altele "urcă". Totuşi, un fapt este uşor de sesizat: stelele nu par să-şi schimbe poziţia "*unele faţă de altele*"; schimbarea, treptată, a aspectului cerului are loc ca şi cum sfera cerească, *în întregime*, s-ar roti în jurul nostru, "ducând" unele stele sub orizont şi "ridicând" altele deasupra orizontului.

Noi ştim că această mişcare *diurnă* (zilnică) aparentă a sferei cereşti este iluzorie, realitatea fiind că *Pământul se roteşte continuu* în jurul axei sale, împlinind o rotaţie într-o zi şi o noapte.

De ce totuşi, stelele nu se mişcă unele faţă de altele, părând "fixate" pe sfera cerească şi mişcându-se doar odată cu aceasta? În realitate, stelele se mişcă în spaţiu, chiar cu viteze foarte mari, însă distanţele deosebit de mari la care se află ele fac ca aceste mişcări "proprii" ale stelelor să fie imperceptibile cu ochii noştrii. Ar trebui să aşteptăm zeci de mii de ani ca să putem constata modificări vizibile cu ochiul liber în aşezarea stelelor pe sfera cerească.

"Fixitatea" stelelor pe sfera cerească a permis oamenilor să le grupeze în *constelaţii*, în funcţie de aşezarea lor pe sfera cerească.

---

[1] anul-lumină (*a.l.*) este o unitate de măsură a distanţelor interstelare şi intergalactice; el este egal cu distanta parcursă de lumină (cu viteza de 300.000 km/s) într-un an. 1 *a.l.* = 9.461.000.000.000 km

Deci, inițial constelațiile au fost grupuri de stele relativ apropiate unele de altele pe sfera cerească, grupuri care puteau să semene cu diferite forme de animale, oameni, obiecte sau animale imaginare (fig. 1.43).

Cu timpul, mai ales după apariția lunetelor şi a telescoapelor, numărul stelelor inventariate de oameni a crescut vertiginos şi a devenit foarte dificil să se decidă la care din constelațiile învecinate să fie "repartizată" fiecare stea nou descoperită.

În consecință, constelațiile "tradiționale" au fost delimitate strict pe sfera cerească, în urma unei convenții internaționale. Aşadar, *actualmente,*

> *constelațiile sunt porțiuni ale sferei cereşti delimitate, în urma unei convenții, prin arce de meridiane şi paralele cereşti*[1].

Din vechile forme, cunoscătorii cerului au reținut - pentru fiecare constelație - doar câteva forme care să le înlesnească orientarea pe sfera cerească (fig. 1.43').

Crearea constelațiilor de către oameni a permis acestora să ajungă treptat la un *sistem* de denumire a stelelor, practic şi uşor de folosit. Pentru a înțelege importanța acestui sistem de denumire a stelelor, vom aminti că numărul stelelor vizibile eu ochiul liber este de aproximativ 6.000! Deci, în orice moment avem deasupra orizontulii nostru cam 3.000 de stele vizibile cu ochiul liber.

Cele mai strălucitoare stele au primit "*nume proprii*", cum ar fi: *Sirius*, *Vega*, *Altair* etc., care se mai utilizează şi azi; dar, evident, nu avea rost să fie "botezate" toate stelele vizibile. Multă vreme, în antichitate şi în evul mediu s-au folosit pentru stelele mai importante denumiri de genui: "steaua din umărul drept al lui Orion", "steaua mare din capul Dragonului", etc.. Cu timpul, s-a ajuns la nomenclatura actuală, mult mai comodă.

Numele constelațiilor se utilizează, în toată lumea, *în limba latină*, iar stelele relativ strălucitoare din fiecare constelație se notează, de obicei, *în ordinea descrescătoare a strălucirilor* (deci în ordinea crescătoare a *magnitudinilor*), cu *literele mici ale alfabetului grec*.

---

[1] despre acestea vom discuta în alt capitol, dar cititorul poate face de pe acum analogia cu corespondentele geografice ale lor

Figura 1.43 Formele primare ale constelațiilor folosite astăzi (reproducere după atlasul lui I.Curea)

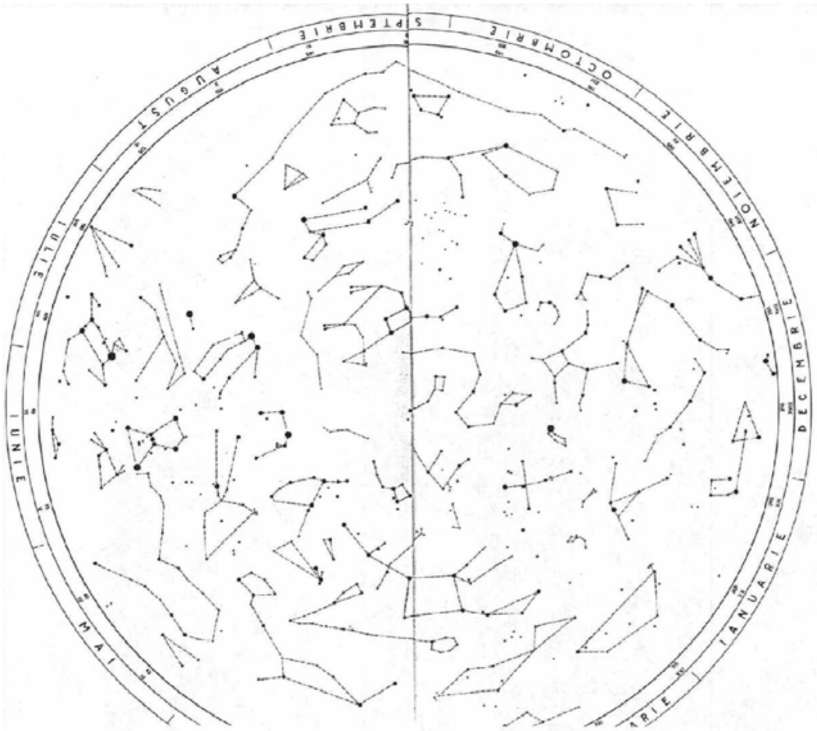


Figura 1.43'
Forme schematizate ale
constelațiilor

În rarele cazuri în care aceste litere nu sunt suficiente, se apelează la literele mici ale alfabetului latin, sau chiar la numere.

Întâlnim deci, denumiri ca "α (alfa) din Lyra" sau "β (beta) din Orion", α (alfa) din Hercules, etc.. Desigur, nici în acest fel nu au fost "denumite" toate stelele vizibile cu ochiul liber, dar cele relativ strălucitoare pot fi denumite fără nici un dubiu. Sutele de mii de stele vizibile doar cu instrumentele astronomice au trebuit să se mulțumească doar cu numerele de ordine din cataloagele stelare unde au fost inventariate.

Cititorul se întreabă, desigur, care mai este, azi, utilitatea constelațiilor, din moment ce între stelele unei constelații nu există nici o legătură fizică, aceste stele aflându-se la distanțe foarte diferite de noi: una poate fi la câțiva ani-lumină, iar alta, aflată alături, poate fi la câteva mii de ani-lumină. Ei bine, să nu uităm că cercetările asupra unui astru încep şi se bazează pe observarea acestuia; constelațiile ne ajută foarte mult tocmai la localizarea obiectelor cosmice pe cer, în vederea observării lor. O informație de genul: "galaxia M 31 se află în constelația *Andromeda*, pe direcția stelelor β şi μ, situată simetric cu β, față de μ" ne permite să găsim imediat galaxia respectivă dacă, bineînțeles, ştim să găsim pe cer constelația Andromeda şi dispunem de o hartă pe care sunt trecute denumirile stelelor.

În tabelul 1.1 sunt date numele constelațiilor, iar tabelul 1.2 cuprinde o listă cu cele mai strălucitoare stele; cu ajutorul acestora, cititorul va putea utiliza corect denumirile stelelor şi va putea înțelege aceste denumiri atunci când le va întâlni în cărțile de astronomie, în *Anuarul Astronomic* sau în reviste.

Mai înainte trebuie să facem însă câteva precizări de amănunt. În scrierea curentă denumirile constelațiilor se prescurtează la trei litere; s-a convenit ca toată lumea să utilizeze aceleaşi prescurtări, care au devenit "*simboluri*" ale constelațiilor. În consecință, vom întâlni şi vom folosi notații de felul "α Ori" (alfa din Orion) sau "β And" (beta din Andromeda) etc..

În limba română exprimarea curentă este de tipul "alfa din Orion" sau "beta din Andromeda" dar, pentru astfel de situații, gramatica latină cere utilizarea *genitivului*, adică a exprimării de genul: "α *Orionis*" ("α *a lui* Orion"), "β *Andromedae*" ("β *a* Andromedei") etc.; deoarece noi nu vorbim în mod curent latineşte, deci nu ştim să declinăm numele constelaţiilor, tabelul cu lista constelaţiilor ne dă, imediat după simbol, forma genitivală a numelui constelaţiei.

Tabelul 1.1 **Lista constelaţiilor actuale**

Nume latinesc (şi terminaţia genitivului)	Numele românesc	Simbol	Trece la meridian la miezul nopţii
Andromeda (-ae)	Andromeda [1])	And	5 IX - 31 X
Antlia (-ae)	Maşina Pneumatică	Ant	12 II - 9 III
Apus (-odis)	Pasărea Paradisului	Aps	19 IV - 27 VI
Aquarius (-i)	Vărsătorul	Aqr	1 VIII - 20 IX
Aquila (-ae)	Vulturul	Aql	2 VII - 1 VIII
Ara (-ae)	Altarul	Ara	31 V - 24 VI
Aries (-tis)	Berbecul	Ari	18 X - 13 XI
Auriga (-ae)	Vizitiul	Aur	1 XII - 28 I
Bootes (-is)	Boarul [2])	Boo	24 IV - 20 V
Caelum (-i)	Dalta	Cae	26 XI - 8 XII
Camelopardalis (-)	Girafa	Cam	9 XI - 29 IV
Cancer (-ri)	Racul	Cnc	19 I - 10 II
Canes (-um) Venatici (-orum)	Câinii de Vânătoare	CVn	24 III - 4 IV
Canis (-) Major (-is)	Câinele Mare	CMa	24 XII - 13 I
Canis (-) Minor (-is)	Câinele Mic [3])	CMi	7 I - 23 I
Capricornus (-i)	Capricornul	Cap	24 VII-21VIII
Carina (-ae)	Carena	Car	23 XII - 12 III
Cassiopeia (-ae)	Cassiopeia [4])	Cas	5 IX - 15 XI
Centaurus (-i)	Centaurul	Cen	9 III - 7 V
Cepheus (-i)	Cefeu [5])	Cep	23 VII - 29 I
Cetus (-i)	Balena	Cet	5 IX - 12 XI
Chamaeleon (-tis)	Cameleonul	Cha	16 I - 19 IV
Circinus (-i)	Compasul	Cir	16 IV - 14 V
Columba (-ae)	Porumbelul	Col	8 XII - 29 XII
Coma (-ae) Berenices (-is)	Părul Berenicei	Com	22 III - 16 IV
Corona (-ae) Australis	Coroana Australă	CrA	21 VI - 11 VII
Corona (-ae) Borealis	Coroana Boreală [6])	CrB	11 IV - 29 V
Corvus (-i)	Corbul	Crv	22 III - 6 IV
Crater (-is)	Cupa	Crt	5 III - 22 VIII

Nume latinesc (şi *terminaţia genitivului*)	Numele românesc	Sim-bol	Trece la meridian la miezul nopţii
Crux (-cis)	Crucea Sudului	Cru	21 III - 6 IV
Cygnus (-i)	Lebăda [7])	Cyg	9 VII - 3 VIII
Delphinus (-i)	Delfinul [8])	Del	26 VII-9 VIII
Dorado (-us)	Peştele de Aur	Dor	20 XI - 31 XII
Draco (-nis)	Dragonul [9])	Dra	10 II - 7 VIII
Equuleus (-ei)	Calul Mic	Equ	6 VIII-13 VIII
Eridanus (-i)	Eridanul	Eri	12 X - 9 XII
Fornax (-cis)	Cuptorul	For	18 X - 19 XI
Gemini (-orum)	Gemenii	Gem	21 XII - 23 I
Grus (-is)	Cocorul	Gru	13 VIII-13 IX
Hercules (-is)	Hercule[10])	Her	20 V - 7 VII
Horologium (-i)	Orologiul	Hor	25 X - 26 XI
Hydra (-ae)	Hidra	Hya	23 I - 7 V
Hydrus (-i)	Hidra Australă	Hyi	22 IX - 30 XI
Indus (-i)	Indianul	Ind	29 VII - 13 IX
Lacerta (-ae)	Şopârla	Lac	21 VIII - 5 IX
Leo (-nis)	Leul[11])	Leo	10 II - 22 III
Leo (-nis) Minor (-is)	Leul Mic	LMi	10 II - 9 III
Lepus (-oris)	Iepurele	Lep	5 XII - 24 XII
Libra (-ae)	Balanţa[12])	Lib	27 IV - 23 V
Lupus (-i)	Lupul	Lup	26 IV - 24 V
Lynx (-cis)	Linxul	Lyn	25 XII - 16 II
Lyra (-ae)	Lira[13])	Lyr	25 VI - 14 VII
Mensa (-ae)	Platoul	Men	11 XI - 15 I
Microscopium (-i)	Microscopul	Mic	29VII-13 VIII
Monoceros (-tis)	Licornul	Mon	20 XII - 23 I
Musca (-ae)	Musca	Mus	12 III - 19 IV
Norma (-ae)	Echerul	Nor	14 V - 31 V
Octans (-tis)	Octantul	Oct	1 I - 21 XII
Ophiuchus (-i)	Ofiucus[14])	Oph	22 V - 3 VII
Orion (-is)	Orion[15])	Ori	2 XII - 28 XII
Pavo (-nis)	Păunul	Pav	17 VI-15 VIII
Pegasus (-i)	Pegas[16])	Peg	9 VIII - 25 IX
Perseus (-ei)	Perseu[17])	Per	14 X - 3 XII
Phoenix (-cis)	Phoenix	Phe	13 IX - 28 X

Nume latinesc (şi *terminaţia genitivului*)	Numele românesc	Sim-bol	Trece la meridian la miezul nopţii
Pictor (-is)	Pictorul	Pic	30 XI - 4 I
Pisces (-ium)	Peştii	Psc	4 IX - 23 X
Piscis Austrinus (-i)	Peştele Austral	PsA	13 XII - 8 IX
Puppis (-)	Pupa	Pup	23 XII - 28 I
Pyxis (-idis)	Busola	Pyx	28 I - 12 II
Reticulum (-i)	Reticulul	Ret	10 XI - 30 XI
Sagitta (-ae)	Săgeata	Sge	7 VII - 27 VII
Sagittarius (-i)	Săgetătorul	Sgr	18 VI - 29 VII
Scorpius (-i)	Scorpionul	Sco	19 V - 21 VI
Sculptor (-is)	Sculptorul	Scl	8 IX - 18 X
Scutum (-i)	Scutul	Sct	27 VI - 7 VII
Serpens (-tis)	Şarpele[18])	Ser	10 V - 7 VII
Sextans (-tis)	Sextantul	Sex	15 II - 5 III
Taurus (-i)	Taurul	Tau	11 XI - 21 XII
Telescopium (-i)	Telescopul	Tel	24 VI - 29 VII
Triangulum (-i)	Triunghiul	Tri	14 X - 3 XI
Triangulum (-i) Australe (-is)	Triunghiul Austral	TrA	5 V - 9 VI
Tucana (-ae)	Tucanul	Tuc	24 VIII - 12 X
Ursa (-ae) Major (-is)	Ursa Mare[19])	UMa	22 I - 29 IV
Ursa (-ae) Minor (-is)	Ursa Mică[20])	UMi	1 I 31 - XII
Vela (-orum)	Velele	Vel	22 I - 14 III
Virgo (-inis)	Fecioara	Vir	17 II - 10 V
Volans (-tis)	Peştele Zburător	Vol	31 XII - 6 II
Vulpecula (-ae)	Vulpea	Vul	7 VI - 14 VIII

Denumiri tradiţionale româneşti:
[1]) Jgheabul; [2]) Văcarul; [3]) Spiţelnicul Mic, Sfredelul; [4]) Tronul, Scaunul lui Dumnezeu, Mănăstirea; [5]) Coasa; [6]) Cununa, Hora; [7]) Crucea mare, Fata cu cobiliţa; [8]) Tăliga; [9]) Balaurul, Zmeul; [10]) Omul; [11]) Calul; [12]) Cumpăna, Cântarul; [13]) Ciobanul cu oile; [14]) Omul cu Şarpele ;[15]) Rariţele; [16]) Puţul, Toaca; [17]) Barda, Căpăţâna; [18]) Calea rătăciţilor; [19]) Carul Mare; [20]) Carul Mic

Semnificaţia ultimei coloane din tabelul 1.1 va fi lămurită în cadrul capitolului următor, 1.3. Înainte de aceasta, vom mai da un tabel, care conţine lista stelelor cu cele mai mari străluciri aparente, (deci cu cele mai mici magnitudini aparente, până la valoarea 2.0 a ei).

Tabelul 1.2 Stelele cu cele mai mari străluciri aparente

Numele stelei	Magnitudinea		Para-axa	Distanța de la Soare		Luminozitatea ($L_{\odot}$)	Clasa spectrală
	Aparentă	absolută					
			0",	a. l.	pc.		
α CMa A (Sirius)	-1,46	1,4	377	8,6	2,65	21,9	A0
α Car (Canopus)	-0,72	-4,4	018	181,0	55,56	4572,8	F0
α Boo (Arcturus)	-0,04	-0,1	097	33,6	10,31	87,1	K0
α Cen A	0,00	4,4	751	4,3	1,33	1,4	G0
α Lyr A (Vega)	0,03	-0,6	133	24,5	7,52	45,7	A0
α Aur A (Capella)	0,06V	-0,4	080	40,7	12,50	114,8	G0
β Ori A (Rigel)	0,12	-7,5	003	1086,1	333,33	79476,8	B8
α CMi A (Procyon)	0,38	2,7	292	11,2	3,42	6,6	F5
α Ori A (Beltegeuse)	0,40	-6,1	005	651,7	200,00	21888,4	M1
α Eri (Archernar)	0,46	-2,7	023	141,7	43,48	955,3	B5
β Cen	0,61	-3,4	016	203,7	62,50	1820,4	B3
ε Peg	0,70V	-5,8	005	651,7	200,00	16603,8	K0
αTau A (Aldebaran)	0,75V	-0,6	054	60,4	18,52	138,1	K5
α Aql A (Altair)	0,77	2,3	202	16,1	4,95	9,6	A5
α Sco (Antares)	0,80V	-4,6	008	407,3	125,00	5497,7	M1
α Vir (Spica)	0,97V	-4,5	008	407,3	125,00	5014,0	B2
β Gem A (Pollux)	1,15	1,0	094	34,7	10,64	31,7	K0
(α PsA) (Formalhaut)	1,16	2,0	149	21,9	6,71	12,6	A3
α Cen B	1,20	5,6	751	4,3	1,33	0,5	K5
β Cru A	1,23V	-4,5	007	465,5	142,90	5014,0	B1
α Cyg (Deneb)	1,25	-7,2	002	1629,1	500,00	60288,5	A2
α Leo (Regulus)	1,35	-0,4	045	72,4	22,22	114,8	B8
α Cru A	1,40	-4,1	008	407,3	125,00	3468,8	B1
ε CMa	1,48	-5,0	005	651,7	200,00	7946,8	B1
λ Sco A	1,59V	-3,0	012	271,5	83,33	1259,4	B1
γ Vel A	1,60	-4,6	006	543,1	166,7	5497,8	B2
γ Ori (Bellatrix)	1,63	-4,1	007	465,5	142,86	3468,8	09
γ Cru A	1,63	-2,5	015	217,2	66,67	794,6	B2
β Tau	1,65	-1,5	023	141,7	43,48	316,3	M4
β Car	1,68	-0,4	038	85,7	26,32	114,8	B8

Numele stelei	Magnitudinea		Paralaxa	Distanța de la Soare		Luminozitatea ($L_\odot$)	Clasa spectrală
	aparentă	absolută					
			0",	a. l.	pc.		
ε Ori	1,68V	-5,9	003	1086,1	333,33	18205,8	A0
α Gru	1,74	0,3	051	63,9	19,6	60,3	B5
ε UMa	1,76V	0,3	052	62,7	19,23	60,3	A0
α Per	1,80	-4,3	006	543,0	166,67	4170,4	F5
δ CMa	1,83	-8,2	001	3258,3	100,00	151444,8	F8
ε Car	1,86	-3,1	010	325,8	100,00	1380,9	K0
η UMa	1,86	-1,3	023	141,7	43,48	263,1	B3
θ Sco	1,87	-1,6	010	325,8	100,00	346,8	F0
β Aur A	1,89V	0,0	041	79,5	24,39	79,4	A0
ξ Ori A	1,90	-5,7	003	1086,1	333,33	15142,8	B0
α UMa	1,90	-0,2	038	85,7	26,32	95,5	K0
ε Sgr	1,90	-2,2	015	217,2	66,67	602,7	A0
α Gem A (Castor)	1,90	1,0	067	48,7	14,93	31,6	A0
α TrA	1,92	-1,2	024	135,8	41,67	239,9	K2
γ Gem A	1,92	-0,2	037	88,1	27,03	95,5	A0
α Pav A	1,94	-2,3	014	232,7	71,43	660,9	B3
α Hya A	2,00	-1,3	022	148,1	45,45	263,1	K2
β CMa	2,00	-4,5	005	651,7	200,00	5014,0	B1
α Ari	2,00	+0,5	049	66,5	20,41	50,1	K2

Litera care însoţeşte uneori numele stelei arată că, în acel caz, este vorba de o stea multiplă, fiecare componentă fiind desemnată printr-o literă care însoţeşte numele sistemului.

Litera "V", care urmează uneori valoarea magnitudinii, arată că aceasta este variabilă, deci strălucirea stelei este variabilă; steaua însăşi este numită, în acest caz, "*variabilă*".

Magnitudinea absolută, *paralaxa*, *luminozitatea* şi *clasa spectrală* a unei stele, ca şi unitatea de distanţă numită "*parsec*", sunt noţiuni care vor fi prezentate abia în capitolele următoare. Însă, deoarece ele apar în toate cataloagele de stele, am socotit că este bine să familiarizăm de pe acum pe cititor cu aspectul acestor cataloage care, de multe ori, conţin şi informaţii încă fără sens, pentru unii cititori.

Capitolul 1.3

OBSERVAŢII ASTRONOMICE CU INSTRUMENTE PRETELESCOPICE

1.3.1 Importanţă şi actualitate

Cu începere de la Galileo Galilei - mai precis, din anul 1611 - astronomia este asociată cu luneta sau cu telescopul, instrumente de observare considerate indispensabile pentru observarea corpurilor şi sistemelor cosmice. Aceste instrumente vor fi prezentate într-un alt capitol.

Aici vrem să atragem atenţia cititorului asupra unui fapt deloc neglijabil, dar din păcate prea de multe ori neglijat: pasul *decisiv*, de la imaginea Universului oferită de simţurile noastre - aşa-numita "concepţie geocentrică" - la o imagine mai realistă ("concepţia heliocentrică") a fost făcut de omenire *pe baza observaţiilor astronomice efectuate cu instrumente extraordinar de simple*, aproape cu "ochiul liber".

Chiar şi legile lui Kepler (contemporanul lui Galilei), care sunt *utilizate şi astăzi* pentru a calcula cu anticipaţie poziţiile pe care le vor ocupa planetele - în spaţiu şi pe cerul nostru - au fost descoperite pe baza observaţiilor efectuate cu instrumentele de dinainte de Galilei (*pre-galileene*, sau pretelescopice).

Dar, dincolo de importanţă istorică evidentă a observaţiilor astronomice cu instrumente pretelescopice, aceste observaţii îşi păstrează un înalt grad de actualitate, în special pentru introducerea în astronomie, deci din punct de vedere *pedagogic*; în capitolul de faţă vom încerca să argumentăm această aserţiune cu câteva exemple.

Înainte de a trece la prezentarea lor, să subliniem, mai întâi, faptul că - nu numai în astronomie! - *gradul de complexitate al instrumenteleor şi procedeelor de măsurare este dictat de gradul de precizie pe care ne propunem să-l atingem*; or, când începem să studiem fenomenele cereşti, nu putem avea pretenţia de a atinge cele mai mari precizii posibile!

Şi, în plus, uneori - pur şi simplu - nu avem la dispoziţie instrumentele pe care le-am dori; în astfel de situaţii, în loc de a nu face nimic, este preferabil să utilizăm ceea ce este la îndemâna noastră şi, procedând cu toată atenţia, să efectuăm măsurătorile dorite cu maximum de precizie posibilă *în condiţiile date*. Nu de puţine ori, astfel de măsurători se pot dovedi deosebit de utile, valoroase chiar din punct de vedere ştiinţific, nu numai educativ; sperăm că exemplele prezentate capitolele precedente sunt sugestive în acest sens.

Astronomia, printre altele, ne învaţă să cercetăm în mod eficient natura *cu mijloace extrem de limitate*, deoarece - în raport cu imensitatea şi complexitatea Universului - mijloacele noastre vor fi, întotdeauna, drastic limitate. *Capacitatea de a exploata în mod inteligent mijloacele cele mai simple* este o calitate care merită să fie cultivată şi inclusă în *formaţia* omului modern, fiind o componentă importantă a relaţiei sale "ecologice" cu lumea înconjurătoare. Vom vedea - în secţiunile următoare ale cărţii de faţă - că această calitate nu vine în contradicţie cu abilitatea de a utiliza cea mai modernă şi sofisticată tehnologie instrumentală ci - dimpotrivă, este complementară acesteia, stimulând *utilizarea ei eficientă şi creatoare*.

În plus, capacitatea de a utiliza eficient mijloacele simple, aflate la îndemâna tuturor, este un factor care contribuie la formarea unei gândiri clare, "aerisite", cu o logică riguroasă, capabilă de conceptualizare creatoare.

1.3.2 Gnomonul

a. Mişcarea aparentă diurnă a Soarelui

Răsăritul Soarelui "şterge" toate stelele de pe cer; lumina deosebit de puternică a astrului zilei se împrăştie în atmosferă şi *tot* cerul devine luminos. Fondul cerului de zi, mult mai strălucitor decât cele mai strălucitoare stele, face ca acestea să nu mai poată fi văzute, chiar dacă se află deasupra orizontului; numai Luna poate fi zărită, extrem de palidă şi ştearsă.

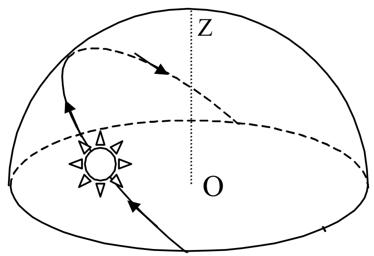


Figura 1. 44

După răsăritul Soarelui, se poate constata deplasarea înceată dar continuă a acestuia atât "în sus" cât şi "la dreapta". "Miezul zilei" este tocmai momentul în care

Soarele ajunge "cel mai sus"; după acest moment, Soarele parcurge un drum simetric cu cel de până acum, coborând spre dreapta până când apune (fig. 1.44). Din expresia inițială "la miez de zi" a derivat "amiazăzi", iar apoi "amiază" şi "miazăzi"; "amiaza" indică momentul culminației Soarelui, iar "miazăzi" punctul cardinal Sud, în direcția căruia are loc această culminație.

Punctul cardinal Nord ("miazănoapte"), diametral opus, indică direcția în care se află Soarele la "miezul nopții".

Evident, o descriere atât de generală şi aproximativă ca aceea de mai sus duce la ideea că, la fel ca toți aştrii, Soarele este *fix* pe sfera cerească, participând,ca şi aceştia, la rotația diurnă a acesteia în jurul axei lumii. Este primul "model matematic" privind mişcarea aparentă a Soarelui, care se impune atenției noastre; din acest model rezultă că mişcarea aparentă a Soarelui ar trebuie să fie identică, în toate zilele.

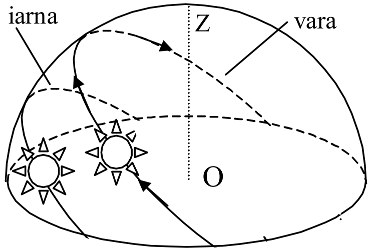


Figura 1. 45

Dar, la o observare mai îndelungată - şi ceva mai atentă - se poate constata că în diferite perioade ale anului Soarele se mişcă diferit pe cer, uneori "mai jos", alte ori "mai sus"; pentru un observator din emisfera nordică, situația se prezintă ca în figura 1.45.

În consecință, modelul inițial, al unui Soare "fix" pe sfera cerească şi participant la mişcarea diurnă a acesteia, nu este un model corect, observațiile arătând că poziția Soarelui pe sfera cerească suferă variații importante în cursul unui an.

Evident, de aceste variații se leagă schimbarea anotimpurilor, cu implicații deosebite pentru viața oamenilor dintotdeauna; au existat, deci, din timpurile preistoriei, motive puternice pentru o urmărire îndelungată, sistematică, a mersului zilnic al Soarelui pe cer.

Pare ciudat, dar o astfel de observare (zile, luni şi ani la rând) întâmpină destul de multe piedici; în multe locuri de pe Pământ înnorările sunt frecvente, uneori de lungă durată. Apoi, nu oriunde orizontul locului este liber "de jur împrejur", pentru ca observatorul să poată vedea şi fixa exact punctele de răsărit şi apus ale Soarelui.

Din acest motiv, locul ideal pentru observarea sistematică a Soarelui este o câmpie foarte întinsă, însorită în cea mai mare parte a anului şi - în acelaşi timp - fertilă, pentru a îngădui înjghebarea aşezărilor omeneşti prospere. Istoria consemnează două astfel de locuri unde s-au dezvoltat în antichitate civilizații puternice şi durabile: Mesopotamia, câmpia cuprinsă între Tigru şi Eufrat ("meso" = între; "potamos" = râuri") şi Egiptul, câmpia fertilizată de revărsările anuale ale Nilului.

Nu întâmplător, primele observații astronomice sistematice au fost efectuate de caldeeni şi babilonieini, locuitorii anticei Mesopotamii, caldeenii fiind renumiți ca astronomi până târziu în lumea antică. Datorită acestui fapt, caldeenii şi babilonienii sunt considerați ca fondatorii astronomiei; Egiptul antic şi-a adus şi el contribuția la consolidarea şi dezvoltarea astronomiei, iar civilizația greacă a preluat cunoştințele acumulate de caldeeni şi babilonieni, dezvoltând astronomia, ca şi matematica, până la cel mai înalt nivel atins în antichitate.

b. Cel mai simplu instrument astronomic

Strălucirea Soarelui este prea puternică pentru ochii noştrii; putem privi la Soare fără a fi "orbiți" doar când el se află aproape de orizont, lumina sa fiind în mare parte absorbită şi atenuată de praful şi vaporii din straturile joase ale atmosferei. Or, pentru a ne face o idee cât mai corectă despre mişcarea aparentă a Soarelui, trebuie să determinăm - la cât mai multe momente din zi - locul pe care-l ocupă acesta pe cer.

Şi aici, ca în multe alte cazuri, ingeniozitatea oamenilor a "întors" în favoarea lor ceea ce părea o circumstanță nefavorabilă.

Pornind de la constatarea că umbra unui obiect este îndreptată mereu de la obiectul respectiv în sens contrar sursei (în cazul de față Soarele), ei au utilizat pentru determinarea poziției Soarelui pe sfera cerească *umbra* unui obiect.

Pentru a facilita determinările, ca *indicator* al mişcării zilnice a Soarelui a fost ales un obiect liniar, fixat vertical[1] pe o porțiune plană, orizontală, de teren. Înălțimea sa nu are importanță, dar trebuie să fie cunoscută, pentru a face posibile calculele ulterioare legate de măsurarea umbrei sale.

---

[1] Verticalitatea se asigură, de exemplu, cu ajutorul "firului cu plumb".

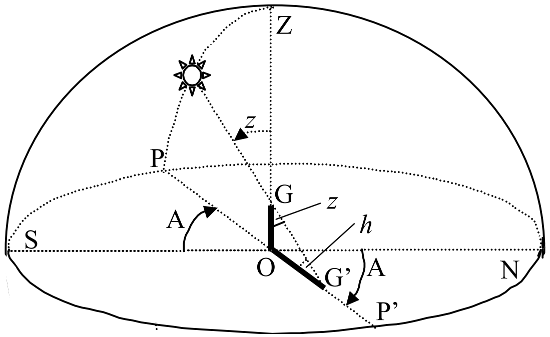


Figura 1. 46

Indicatorul poate fi un băț de lemn sau o țeavă metalică înfiptă în Pământ, un stâlp, sau chiar o vergea montată pe o mică planşetă fixă (fig. 1.47); important este ca locul pe care cade umbra (planşeta sau terenul din jur) să fie plan şi orizontal, iar indicatorul să fie aşezat vertical.

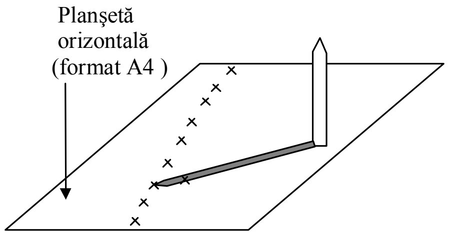


Figura 1. 47

Corespondentul grecesc al cuvântului "indicator" este "*gnomon*", nume sub care acest "instrument astronomic" s-a răspândit în lumea întreagă.

Este important să subliniem faptul că, cu toată simplitatea sa, gnomonul permite "legarea" unor elemente geometrice esențiale: planul orizontal, verticala locului şi direcția observator-Soare; primul este materializat de terenul din jurul gnomonului, al doilea de gnomonul însuşi, iar direcția observator-Soare este definită de două puncte: capătul umbrei şi vârful gnomonului.

Gnomonul şi umbra sa reprezintă două laturi ale unui triunghi numit "*triunghi gnomonic*" (ΔGOG', în figura 1.46), acesta este întotdeauna *dreptunghic*, deoarece verticala locului (gnomonul) este perpendiculară pe orice dreaptă din planul orizontal, deci pe oricare din "ipostazele" umbrei sale.

Deoarece lungimea l_g gnomonului (OG) este cunoscută din construcție şi este mereu aceeaşi, pentru determinarea completă a triunghiului gnomonic - la orice moment - este suficientă măsurarea lungimii l_u a umbrei (OG').

Înălţimea unghiulară *h* a Soarelui (unghiul G' al triunghiului gnomonic) poate fi determinată pe cale grafică, construind pe hârtie un triunghi asemenea ("redus la scară") cu cel gnomonic şi măsurând cu raportorul unghiul corespunzător. Dar, evident, este mai indicat să determinăm acest unghi prin calcul, din relaţia imediată:

$$\mathrm{tg}h = \frac{\mathrm{OG}}{\mathrm{OG'}} = \frac{l_g}{l_u} \quad .$$

Dar gnomonul permite mai mult decât determinarea înălţimii unghiulare a Soarelui la diverse momente din timpul zilei; direcţia umbrei ne dă posibilitatea de a determina unghiul dintre planul vertical al Soarelui[1] şi direcţia spre punctul cardinal Sud. Acest unghi se numeşte - în astronomie - *azimutul* Soarelui; în geodezie, topografie, orientarea turistică etc., azimutul se măsoară de la Nord.

Dar, evident, pentru aceasta este necesar să fi fost determinată în prealabil, *o dată pentru totdeauna*, direcţia de la punctul ("locul") de observare spre punctul cardinal Sud; această direcţie se mai numeşte *meridiana locului*.

c. Determinarea meridianei cu ajutorul gnomonului

Meridiana locului coincide cu direcţia umbrei gnomonului din momentul culminaţiei Soarelui; în plus, în acest moment, umbra gnomonului are lungimea minimă din timpul zilei respective.

Dar, din motive care vor fi expuse în secţiunile următoare ale acestei cărţi, momentul trecerii Soarelui prin dreptul punctului Sud *nu* este, de regulă, exact ora 12^h a zilei respective. În consecinţă, pentru a cunoaşte momentul culminaţiei Soarelui, avem nevoie de informaţii adiţionale, pe care le putem extrage, eventual, dintr-un *Anuar Astronomic*.

Nici proprietatea de minim a umbrei în momentul trecerii la meridian nu poate fi utilizată practic, deoarece lungimea minimă este greu de sesizat cu o precizie satisfăcătoare.

---

[1] Plan definit de verticala locului şi Soare (considerat "redus" la centrul său); acesta este - evident - chiar planul triunghiului gnomonic.

Cel mai sigur (robust, puțin sensibil la erori) procedeu pentru determinarea meridianei locului se bazează pe simetria traiectoriei aparente a Soarelui față de planul meridian al locului, în limite satisfăcătoare de precizie pentru intervale de câteva ore. Datorită acestei simetrii, două lungimi egale ale umbrei gnomonului vor corespunde la două poziții simetrice ale Soarelui față de planul meridian, deci umbrele respective vor fi simetrice față de meridiana locului. Or, umbrele simetrice fiind laturile unui unghi cu vârful în baza gnomonului, meridiana locului va fi tocmai bisectoarea unghului respectiv.

Pregătind determinarea meridianei, vom trasa în jurul gnomonului câteva cercuri concentrice, de raze diferite. Figura 1.48 prezintă situația din planul orizontal, fiind figurat doar punctul de bază al gnomonului, precum şi cercurile trasate. Observând Soarele înainte de trecerea la meridian, vom marca, pe fiecare cerc, punctul în care capătul umbrei gnomonului se "aşează" pe cercul respectiv. Continuând observarea şi după trecerea la meridian, vom marca perechile punctelor de până acum.

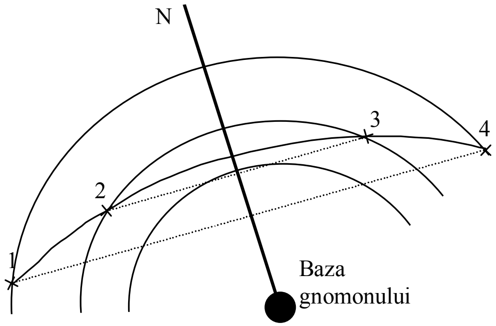


Figura 1. 48

Dacă am efectuat cu atenție toate marcările, mijloacele tuturor coardelor trebuie să fie *coliniare* şi dispuse pe o dreaptă perpendiculară pe fiecare coardă, dreaptă care în plus - trece prin piciorul gnomonului. Această dreaptă este, evident, meridiana locului.

Determinarea meridianei permite cunoaşterea punctelor cardinale pentru locul respectiv de observație. Este prima informație pe care un om care se instalează într-un loc ar trebui să o posede; din păcate, omul modern - cel puțin citadinul - pare să fi pierdut această obişnuință a orientării şi, de multe ori, nici nu ştie că Soarele se află, la amiază, deasupra punctului cardinal Sud.

d. Variația anuală a înălțimii Soarelui la amiază

Înălțimea Soarelui la amiază nu pare să fie o informație substanțială; totuşi, ca şi în alte cazuri, determinarea perseverentă a acestei mărimi, pe perioade mari de timp, a constituit una din preocupările primilor observatori ai fenomenelor cereşti.

Figura 1.49 prezintă un grafic al variației anuale a înălțimii Soarelui la amiază, pentru un observator din emisfera nordică, mai precis, aflat la latitudinea nordică de 45°. Prin puncte sunt redate pe grafic determinările zilnice, iar curba trasată este menită să completeze perioadele în care nu s-au putut efectua observații, din cauza norilor.

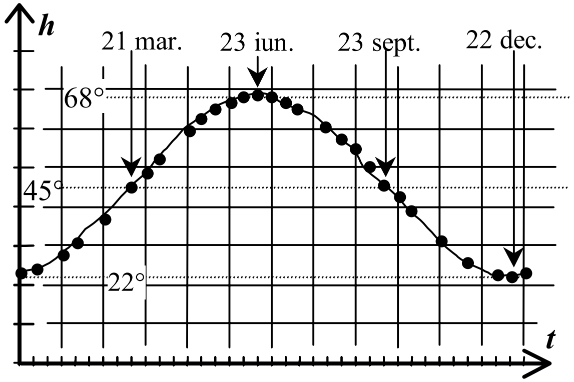


Figura 1. 49

Vom vedea mai târziu (în partea a II-a) câte informații consistente se pot deduce din acest grafic; printre altele, de aici poate fi dedusă *latitudinea locului de observare*, dar mai poate fi dedusă de aici şi o mărime care priveşte întreg Pământul: înclinarea axei acestuia pe planul orbitei sale sau, ceea ce este echivalent, *unghiul dintre planul ecuatorului terestru şi planul orbitei Pământului*.

1.3.3 Astronomia meridiană

a. Meridianul geografic şi cel astronomic (ceresc) al unui loc

Astronomii au înțeles, încă din antichitate, că Pământul are o formă aproximativ sferică; ei au considerat că Pământul este fix, iar sfera cerească - mai precis, sfera stelelor "fixe" - se roteşte în jurul unei axe - numită "axa lumii" - care trece prin centrul Pământului. Noi ştim, astăzi, că Pământul este cel care se roteşte, dar acest fapt nu schimbă aparența fenomenelor cereşti observate, ci numai explicația acestora.

Planul care trece prin axa lumii (sau a Pământului) şi un punct de pe suprafaţa acestuia se numeşte "planul meridian al locului respectiv" (v.fig. 2.9, din partea a II-a); planul meridian al unui loc intersectează suprafaţa ideală a Pământului după un cerc numit "meridianul geografic al locului". Meridiana locului poate fi considerată ca o concretizare "locală" a meridianului geografic. Planul meridian al unui loc, trecând prin centrul Pământului şi prin locul de observare (deci, prin două puncte de pe verticala locului), include în el verticala locului.

Planul meridian intersectează sfera cerească după un cerc mare, numit "meridianul ceresc al locului"; meridianul ceresc al locului este fix în raport cu locul de observare. Datorită rotației aparente a sferei cereşti, aceasta din urmă este mobilă în raport cu meridianul locului, "ducând" - pe rând - toți aştrii de pe ea de la răsărit către meridian şi apoi de la meridian către apus.

Trecerea la meridian a unui astru înseamnă traversarea de către acesta a planului meridian al locului de observare, indiferent dacă se consideră Pământul fix sau în rotație. Dar planul meridian conține meridianul geografic respectiv, deci **trecerea la meridian a unui astru are loc simultan pentru toate punctele de pe un meridian geografic!**

b. Eratostene: determinarea razei Pământului

Bazându-se pe această idee geometrică simplă, evidentă, Eratostene, care a trăit la Alexandria, între anii 275-195 î.C., a reuşit să determine, pentru prima oară, raza Pământului; în plus, determinarea lui Eratostene a fost deosebit de precisă, având în vedere mijloacele utilizate.

Dar, pentru a realiza această determinare, Eratostene a dispus, în afară de "idee", de observațiile efectuate în două locuri diferite de pe un acelaşi meridian geografic. Mai precis, este vorba despre Alexandria şi Syena (azi Assuan), aflate aproximativ pe acelaşi meridian, de-a lungul căruia curge Nilul. Între cele două oraşe circulau în mod frecvent caravane, distanța dintre ele fiind astfel relativ precis cunoscută; ea se considera a fi de 5000 de stadii (1 stadie $\cong$ 157,5 m). Ei bine, Eratostene fiind bibliotecar la celebra bibliotecă din Alexandria, a citit relatările de călătorie la Syena şi a reținut din aceste un fapt interesant: în ziua solstițiului de vară (deci, în "miezul verii"), la Syena Soarele ajungea la amiază atât de sus pe cer, încât lumina direct fundul unui puț adânc de apă!

Cu alte cuvinte, Soarele trecea la meridian, la Syena, chiar la zenit, atingând verticala locului; înălțimea sa unghiulară era, deci, de 90°.

Ori, la Alexandria, în aceeaşi zi de solstițiu, înălțimea maximă a Soarelui (deci, la meridian) era cu 7°12' mai mică de 90°! Reprezentându-şi situația din planul meridian al celor două localități, ştiind că Soarele se află - la amiază - în acest plan, Eratostene a mai făcut o ipoteză suplimentară: a presupus că Soarele este infinit de departe, în raport cu distanța dintre cele două oraşe. Cu alte cuvinte, el a presupus că razele de lumină solară care ajung în cele două puncte de pe Pământ sunt paralele (fig. 1.50).

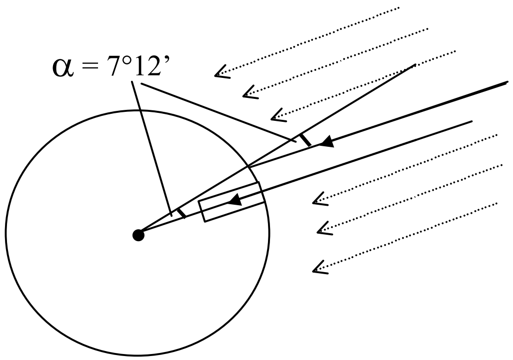


Figura 1. 50

În aceste condiții, din figură se vede imediat că unghiul de 7°12' reprezintă tocmai unghiul - la centrul Pământului - format de verticalele celor două oraşe, deci de razele terestre respective; într-adevăr, unghiul la centru este "corespondent" cu unghiul format de verticala Alexandriei cu direcția razelor solare. Ori, teorema paralelelor tăiate de o secantă era bine cunoscută încă din acea vreme!

Dacă la unghiul la centru respectiv (7°12') corespunde arcul cuprins între cele două raze (distanța de 5000 de stadii), regula de trei, simplă, arată că la un unghi "complet", de 360°, corespunde o circumferință (lungime a meridianului) de aproximativ 250.000 de stadii, adică 39.690 km. Această lungime a meridianului este foarte apropiată de cea admisă azi, 40.075,24 km.

Calculul razei Pământului este imediat şi îl lăsăm pe seama cititorului. De asemenea, lăsăm în seama cititorului şi *generalizarea* metodei lui Eratostene, în ideea că doi observatori - aflaţi pe un acelaşi meridian geografic - cunosc distanţa dintre ei şi observă trecerea la meridian a Soarelui, determinând înălţimea acestuia cu ajutorul gnomonului, într-o zi oarecare a anului.

În încheiere, o remarcă de ordin istoric: determinarea lui Eratostene a fost uitată după un timp, iar determinările pe care le-au făcut arabii, mult mai târziu, în epoca de maximă înflorire a civilizaţiei lor, nu au fost atât de bune. În consecinţă, în timpul lui Columb nu se dispunea de o apreciere sigură a dimensiunilor Pământului, iar marele explorator a subapreciat cu mult aceste dimensiuni, astfel că numai existenţa continentului american a salvat de la un sfârşit tragic temerara sa expediţie.

c. Localizarea stelelor pe sfera cerească

Pornind de la localizarea Soarelui pe sfera cerească cu ajutorul gnomonului, se poate imagina o modalitate de localizare a stelelor pe această sferă, prin poziţionarea observatorului în diferite locuri din jurul gnomonului, astfel încât acesta să vadă steaua vizată chiar în vârful gnomonului (fig. 1.51).

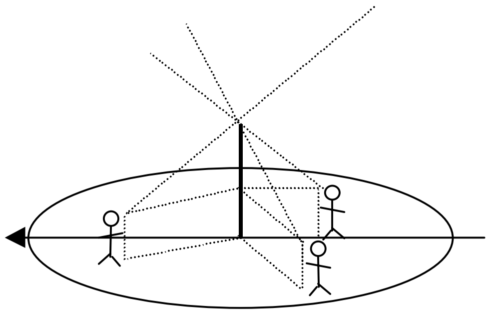


Figura 1. 51

Totuşi, o astfel de localizare ar fi afectată de erori considerabile, datorită imposibilităţii de a măsura precis, de fiecare dată, distanţa de la ochiul observatorului la gnomon precum şi azimutul direcţiei observator-gnomon.

De aceea, s-a preferat, şi în acest caz, observarea stelelor în momentul trecerii lor la meridian. S-a instalat un mic orificiu prin care se vizau stelele şi, de asemenea, în planul meridian, un "raportor" de cât mai mari dimensiuni, cu centrul în orificiul de vizare (fig. 1.52).

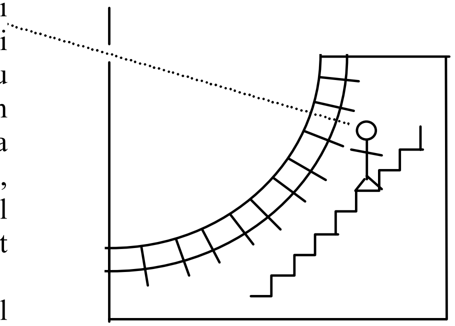


Figura 1. 52

Raza mare a raportorului permitea trasarea pe acesta a unui număr mare de diviziuni pentru citirea unghiurilor; de fapt, un sfert de cerc era suficient pentru a citi toate înălţimile posibile, cuprinse între 0° şi 90°. Un astfel de instrument s-a numit, din acest motiv, *cuadrant*.

Deoarece meridianul ceresc al locului (fix în raport cu observatorul) coincide, în momentul trecerii stelei la meridian, cu meridianul ceresc al stelei (mobil faţă de observator, dar fixat pe sfera cerească), măsurarea înălţimii stelei permite localizarea ei pe meridianul respectiv ceresc.

Poziţionarea completă a stelei pe sfera cerească mai necesită şi determinarea poziţiei meridianului ei faţă de un meridian ceresc luat ca origine. Ca meridian-origine poate fi ales, de exemplu, meridianul unei stele strălucitoare, uşor de recunoscut pe cer.

Măsurarea directă a unghiului dintre cele două plane (al meridianului stelei şi al meridianului-origine) este destul de greu de efectuat. De aceea, s-a recurs la o metodă mult mai simplă şi eficientă, bazată pe faptul că toate meridianele de pe sfera cerească se rotesc odată cu aceasta, în mod uniform. În consecinţă, se măsoară *unghiul dintre cele două plane* prin *timpul* scurs între trecerile la meridianul locului ale celor două plane meridiane. De aceea, coordonata unghiulară respectivă a stelei (numită *ascensie dreaptă*) se exprimă în unităţi de timp.

Aceste probleme vor fi tratate mai amănunţit în partea a II-a a lucrării de faţă; reţinem însă, de pe acum, legătura fundamentală dintre determinările astronomiei "de poziţie" şi problema măsurării timpului.

Bineînţeles, ar fi interesantă urmărirea evoluţiei păstrătoarelor de timp, a ceasurilor în general, dar cadrul de faţă nu ne permite astfel de incursiuni de ordin istoric.

Capitolul 1.4

AŞTRI MOBILI PE SFERA CEREASCĂ

1.4.1 Soarele

Aceste modalităţi de observare a stelelor au avut şi o nouă aplicaţie, în ceea ce priveşte completarea studiului poziţiei Soarelui pe sfera cerească; într-adevăr, până acum, din observaţiile "de zi", nu s-a putut pune în evidenţă decât una din componentele mişcării anuale a Soarelui (pe meridianul său ceresc).

Localizarea meridianului ceresc al Soarelui faţă de meridianul ceresc de origine este dificil de realizat ca în cazul stelelor, deoarece ziua nu putem vedea stelele de pe cer. Dar, luând ca unitate de timp "ziua solară", deci intervalul de timp dintre două amieze, putem să tragem concluzia că, după o jumătate de zi, deci la miezul nopţii, Soarele se va găsi tot la meridianul locului, dar în partea de Nord (miazănoapte!), sub orizont, bineînţeles.

Atunci, observând ce stea trece la meridian exact la miezul nopţii, determinând ascensia dreaptă a acestei stele prin metoda descrisă în paragraful precedent, avem posibilitatea de a determina - indirect - poziţia "completă" a Soarelui pe sfera cerească.

Surpriza este constatarea că la miezul nopţii trec la meridianul unui loc ... mereu alte stele, astfel că în fiecare anotimp se află în partea sudică a cerului alte constelaţii; o cunoaştere a tuturor constelaţiilor nu este, deci, posibilă, decât prin urmărirea cerului de-a lungul unui an întreg.

Revenind la Soare, cele de mai sus ne arată că el se deplasează pe sfera cerească - într-un an - nu numai pe meridianul său, cum arată observaţiile de zi, ci şi "de la un meridian la altul", mereu în acelaşi sens (invers mişcării diurne).

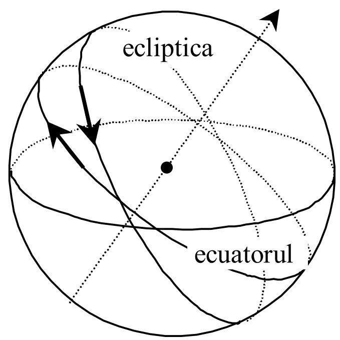


Figura 1. 53

În concluzie: Soarele se deplasează anual pe un cerc mare al sferei cereşti, cerc numit *ecliptică*; de fapt, planul eclipticii este proiecția pe sfera cerească a planului în care are loc mişcarea Pământului în jurul Soarelui. Deoarece mişcarea Soarelui pe ecliptică se realizează în aproximativ 365,25 de zile (un an), rezultă că el se deplasează pe ecliptică, zilnic, cu aproximativ 1°; de altfel *chiar aici îşi are originea această unitate de măsură pentru unghiuri*!

Astronomii dinainte de Copernic (cu o singură excepție, a lui Aristarh din Samos) considerau că Pământul este nemişcat, deci ei considerau ca fiind reale atât mişcarea diurnă a sferei cereşti, cât şi mişcarea anuală a Soarelui pe sfera cerească. Vom mai reveni asupra acestor probleme; aici menționăm doar existența, din cele mai vechi timpuri, a datelor de observație referitoare la cele două mişcări.

1.4.2 Luna

Localizarea Lunii pe sfera cerească este mult mai uşor de realizat decât localizarea Soarelui, deoarece Luna este vizibilă şi noaptea, pe cerul înstelat. În consecință, orice observator - chiar neavizat - îşi poate da seama că Luna se deplasează printre stele, de la o noapte la alta, cu aproximativ 12°, împlinind o deplasare completă într-o ... lună.

Traiectoria mişcării lunare este tot un cerc mare al sferei cereşti; intersecțiile acestuia cu ecliptica sunt două puncte diametral opuse de pe sfera cerească, numite "noduri" ale orbitei lunare; unul este numit "ascendent", celălalt "descendent". Evident, dacă Luna ajunge într-unul din noduri (deci pe ecliptică) simultan cu Soarele, va avea loc o eclipsă de Soare; dacă Luna ajunge într-unul din noduri în acelaşi moment în care Soarele ajunge în nodul opus, va avea loc o eclipsă de Lună. Tocmai din acest motiv traiectoria anuală a Soarelui a fost numită "ecliptică".

În ciclul fazelor lunii există un scurt interval în care Luna nu este deloc vizibilă; este faza numită "*Lună nouă*" (fig. 1.54 a). Ea are loc atunci când Luna se află, aproximativ, *între* Soare şi Pământ; atunci terminatorul coincide - aproximativ - cu limbul Lunii, dar partea luminată a suprafeței lunare se află îndreptată, în întregime, spre Soare, fiind inaccesibilă unui observator terestru.

Dacă planul orbitei Lunii ar coincide cu planul orbitei Pământului, în faza de Lună nouă ar trebui să se producă - lunar, deci - o eclipsă de Soare; simplul fapt că aceste eclipse nu se produc cu această periodicitate (lunar) arată că cele două plane nu coincid! Vom trata mai târziu câteva probleme legate de eclipse.

1.4.3 Planetele

a. Mişcările aparente ale planetelor

O altă surpriză ne-o oferă câteva din cele mai strălucitoare stele de pe cer; spre deosebire de imensa majoritate a stelelor, acestea nu au poziţii fixe pe sfera cerească, ci se deplasează printre celelalte stele, lent, e adevărat, dar sensibil chiar în cazul unor observaţii rudimentare.

În plus, spre deosebire de Lună şi de Soare, care se deplasează uniform, mereu în acelaşi sens, pe câte un cerc mare, stelele de care vorbim "rătăcesc" pur şi simplu, pe sfera cerească! De aceea, ele au fost numite "stele rătăcitoare" sau, după cuvântul grecesc corespunzător, *planete* (fig. 1.56).

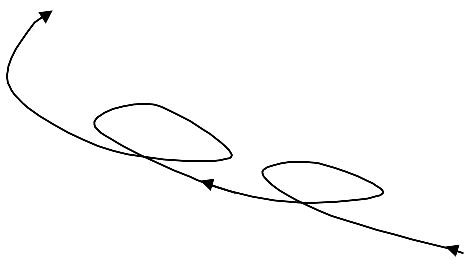


Figura 1.56

Probema planetelor, adică problema descrierii şi explicării mişcărilor planetelor, a constituit timp de milenii una din problemele fundamentale a astronomiei; complicaţia ei consta tocmai în deosebirea esenţială dintre aceste mişcări şi celelalte mişcări cereşti cunoscute: mişcarea diurnă a sferei cereşti, mişcarea Soarelui şi a Lunii pe sfera cerească.

Planetele au primit nume proprii, ale zeilor din mitologiile antice; noi folosim şi azi numele pe care le-am moştenit de la romani: Mercur, Venus, Marte, Jupiter şi Saturn, iar planete descoperite în epoca modernă au primit nume din aceeaşi categorie: Uranus, Neptun şi Pluto.

b. Scintilaţia

Recunoaşterea planetelor este o problemă aparent dificilă, cel puţin pentru cei care nu dispun de informaţii "la zi" privind poziţiile acestor obiecte pe sfera cerească.

Mai mult, persoanele care încearcă să recunoască pe cer constelaţiile de pe hărţile cereşti sunt confruntate cu următorul paradox:

- planetele ne captează atenţia prin strălucirea lor;
- totuşi, planetele, cele mai strălucitoare "stele" de pe cer, nu figurează pe hărţile cereşti, neavând poziţii fixe faţă de stele.

În aceste condiţii, hărţile cereşti sunt uneori aproape imposibil de utilizat cu eficienţă. Totuşi, un fenomen optic ne vine în ajutor, pentru a putea discerne planetele de stele; este vorba de *scintilaţie*, sau "sclipire", care este caracteristică stelelor "veritabile", fiind absentă în cazul planetelor. De ce?

Explicaţia este relativ simplă, dacă ţinem seama de faptul că cele două categorii de obiecte se află la distanţe care nu suferă comparaţie.

Astfel, stelele se află la distanţe atât de mari încât nu pot prezenta decât imagini punctuale, prin orice instrument, cu atât mai mult cu ochiul liber. Raza de lumină care vine de la stea la observator este tot timpul abătută din drum la trecerea prin masele de aer de diferite temperaturi şi densităţi. Fenomenul este analog cu "agitaţia" imaginilor de deasupra şoselelor încălzite de Soarele verii; el se mai numeşte refracţie atmosferică.

Această "abatere" a razei, datorită refracţiei atmosferice, dă impresia că steaua "se stinge" şi "se aprinde" tot timpul.

Planetele, pe de altă parte, deşi par a avea imagini stelare, se află la distanţe mult mai mici, oricum destul de mici pentru a avea diametre unghiulare nu chiar neglijabile, ca stelele.

Aceasta face ca efectul refracţiei să se producă pe fondul unui mic disc-imagine, care nu se "stinge" nici un moment; spunem că refracţia "se integrează" pe discul aparent al imaginii planetare.

În concluzie, chiar dacă nu ştim ce planetă privim, putem să afirmăm cu certitudine că privim o planetă şi nu o stea, dacă imaginea acesteia nu prezintă fenomenul de scintilaţie!

c. Configurații cerești (conjuncții, opoziții, cuadraturi)

Apropierea maximă (aparentă, pe sfera cerească) a două obiecte cereşti se mai numeşte "*conjuncție*"; astfel, o planetă poate fi - la un moment dat - în conjuncție cu o stea, cu o altă planetă, cu Luna sau cu Soarele. Dacă nu se specifică un al doilea astru, se subînțelege că este vorba despre conjuncția cu Soarele.

Dacă o planetă se află în direcția opusă Soarelui, se spune că ea este la "*opoziție*"; azi, când ştim că observatorul terestru, ca şi planeta observată, se mişcă în jurul Soarelui pe orbite aproape circulare, este uşor să ne dăm seama că la opoziții planetele sunt cel mai aproape de Pământ.

Cu alte cuvinte, aceste perioade sunt optime pentru observarea planetelor; există chiar o categorie importantă de planete - planetele mici, sau asteroizii - care nu pot fi observate decât in jurul opozițiilor.

Dar unele planete (Mercur şi Venus) nu ajung niciodată să fie în opoziție cu Soarele, pentru simplul motiv că Pământul nu se poate afla între Soare şi planeta respectivă.

Aceste planete sunt numite "interioare", deoarece orbitele lor sunt înconjurate de orbita Pământului; înainte de a se cunoaşte acest lucru, ele erau numite "inferioare", deoarece se află mereu în apropierea Soarelui, deci nu sunt vizibile decât relativ jos, imediat după apusul Soarelui, sau (dimineața) înainte de răsăritul acestuia.

Distanța unghiulară dintre Soare şi o planetă se mai numeşte "elongație" a acesteia; este evident că, în cazul planetelor interioare elongația nu poate depăşi o valoare maximă, în timp ce elongația planetelor exterioare poate atinge, la opoziții, 180º.

O altă configurație interesantă este cea de *cuadratură*, în cadrul căreia direcțiile spre cele două corpuri formează un unghi drept.

Deşi azi nu se mai acordă o atenție deosebită acestor configurații, ele au constituit multă vreme "piatra de încercare" a predicțiilor astronomice, putând fi relativ sigur observate, chiar în condițiile preciziei modeste a observațiilor din vechime.

1.4.4 Faze

a Fazele Lunii şi ale planetelor

Revenind la descrierea fazelor Lunii (fig. 1.54 a)[1]., să menționăm că timpul scurs de la momentul ultimei faze de Lună nouă, exprimat în zile, se numeşte "*etatea Lunii*" (a nu se confunda cu "vârsta"!).

În serile imediat următoare, spre sfârşitul amurgului (crepusculului), se poate vedea secera tot mai lată a Lunii apropiindu-

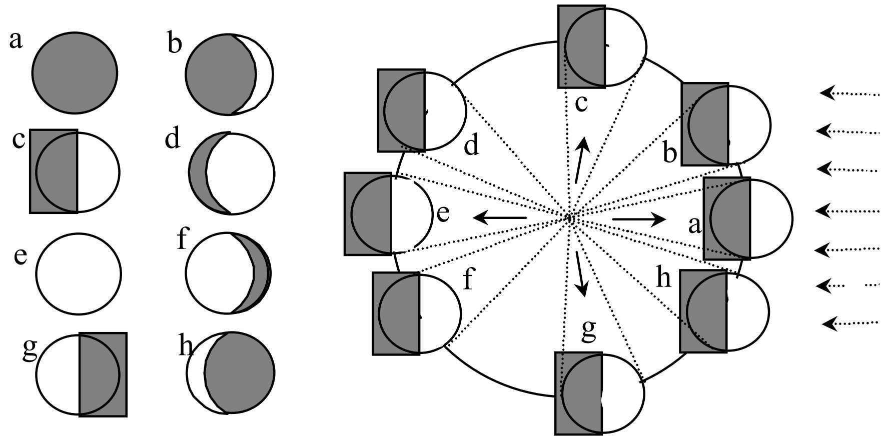


Figura 1. 54

se de orizont; ea apune în fiecare seară mai târziu, ceea ce ne arată că distanța unghiulară dintre Lună şi Soare este tot mai mare pe măsură ce secera se măreşte. Faza în care vedem cea mai îngustă seceră, foarte aproape de Soarele abia asființit se mai numeşte, la români, "*Crai nou*"; nu trebuie confundat cu Luna nouă!

De la seară la seară, secera Lunii devenind tot mai lată (fig. 1.54 b), după câteva seri, Luna se prezintă privitorului sub forma unei *jumătăți de disc circular* (fig. 1.54 c); în paralel, după cum am mai

---

[1] În partea stângă a figurii sunt grupate formele pe care le prezintă Luna observatorului aflat pe Pământ, în timp ce partea principală (din dreapta) prezintă configurațiile sistemului Soare-Lună-Pământ, care generează fazele Lunii.

menționat, distanța unghiulară Lună-Soare crește continuu. Evident, în acest timp Luna devine tot mai strălucitoare şi apune din ce în ce mai târziu. Când vedem jumătate din discul Lunii, noi vedem o pătrime din suprafața lunară; faza respectivă se numeşte, de aceea, "*primul pătrar*".

"Creşterea" Lunii continuă şi în serile următoare (fig. 1.54 d), însoțită de creşterea distanței unghiulare dintre Lună şi Soare; acesta devine (aproximativ) un unghi alungit în momentul în care Luna se prezintă sub forma unui *disc circular complet* ("*Lună plină*", fig 1.54 e). Când Luna este "plină", ea răsare seara când apune Soarele, apoi se înalță tot mai sus pe cerul nocturn, trecând la meridian aproximativ la miezul nopții. Luna plină apune dimineața, când răsare Soarele.

Dacă planul orbitei Lunii ar coincide cu planul orbitei Pământului, în faza de Lună plină ar trebui să se producă - lunar, deci - o eclipsă de Lună; dar nici aceste eclipse nu se produc cu periodicitate lunară, ceea ce arată, din nou, că că cele două plane nu coincid!

După Lună plină, unghiul Soare-observator-Lună, considerat în sensul direct, devine mai mare de 180° (fig. 1.54 f), continuând să crească zi de zi; dar, acum, această creştere duce la "apropierea" Lunii de Soare pe cer. Luna răsare tot mai târziu, noaptea, putând fi observată la ore tot mai "incomode". Dacă, totuşi, o observăm, constatăm că ea a început să "descrească". Când unghiul Soare-observator-Lună, considerat în sensul direct, devine egal cu 270° (fig. 1.54 h), luna este în faza de "*ultim pătrar*".

După câteva zile descoperim că Luna este pe cer ziua; ea a răsărit înaintea Soarelui şi este vizibilă bună parte din zi. E adevărat că de data asta nu mai este atât de impresionantă, arătând palidă şi ştearsă pe fondul luminos al cerului de zi, astfel încât se poate întâmpla să nici nu-i remarcăm prezența.

Căutând-o "înaintea Soarelui", pe direcția mişcării diurne a acestuia, o putem găsi totuşi; vom constata "scăderea" ei continuă pe măsura "apropierii" de Soare; secera Lunii, tot mai subțire, este invers orientată ca la început (fig. 1.54 g, comparată cu 1.54 b). Vine apoi o perioadă de 2-3 zile în care Luna nu mai este vizibilă sub nici o formă; dar, după această dispariție vremelnică, Luna reapare în crepuscul, pe cerul vestic şi tot ciclul reîncepe.

Deoarece mişcarea aparentă a Lunii, începând cu Lună nouă, se face spre *stânga* Soarelui, iar limbul luminat al Lunii (care este semicircular) este întotdeauna îndreptat spre Soare, rezultă că, în timpul "creşterii" ei, faza Lunii sugerează literea D; invers, dacă Luna descreşte, faza ei sugerează litera C. Rezultă o regulă foarte simplă pentru stabilirea "tendinţei" Lunii după aspectul ei la un moment dat; ea se bazează pe "ideea" că "*Luna este mincinoasă*": când arată ca litera D, ne spune că "Descreşte" dar, de fapt, ea creşte; când seamănă cu litera C, analog, deducem că Luna descreşte. Latinii spuneau, lapidar: "*Cum D crescit, cum C decrescit*".

Menţionăm că fazele intermediare (diferite de *Luna nouă*, *primul pătrar*, *Luna plină* şi *ultimul pătrar*) nu au nume speciale; o fază oarecare este bine caracterizată prin etatea Lunii. Ţinând seama de durata unei lunaţii (29^z12^h), etatea Lunii la un moment dat ne indică, în mod satisfăcător, faza acesteia; de exemplu, etatea de 7 zile indică faptul că Luna este foarte aproape de primul pătrar, etatea de 17 zile arată că Luna este între Lună plină şi utlimul pătrar, etc..

Să mai menţionăm aici un fenomen interesant: când etatea Lunii este foarte mică şi, în consecinţă, ea prezintă observatorului o seceră foarte îngustă, partea întunecată a Lunii (inclusiv limbul neluminat de Soare) poate fi, totuşi, "întrezărită" datorită unei lumini abia perceptibile! Este vorba de aşa-numita "*lumină cenuşie*", a cărei explicaţie a fost dată de Leonardo da Vinci: este vorba de slaba iluminare a suprafeţei lunare de către *lumina solară reflectată în spaţiu de Pământ*.

Fazele planetei Venus au fost descoperite chiar de Galileo Galilei, cel care, primul, în anul 1611, a îndreptat spre cer o lunetă. Nu vom descrie aici ciclul fazelor lui Venus, deoarece observarea acestora este posibilă doar prin lunete sau telescoape; vom menţiona doar că, deoarece orbita lui Venus se află *între* Soare şi Pământ, distanţa unghiulară dintre Soare şi Venus, numită şi *elongaţie*, nu poate depăşi o anumită valoare (elongaţia maximă), deci corelaţia fazelor cu distanţa unghiulară Soare-Venus nu este aceeaşi ca în cazul Lunii. Totuşi, în figura 1.55 sunt date poziţiile care corespund fazelor principale, precum şi aspectul pe care-l prezintă planeta Venus în momentele respective. Este de remarcat variaţia în timp a diametrului unghiular al planetei.

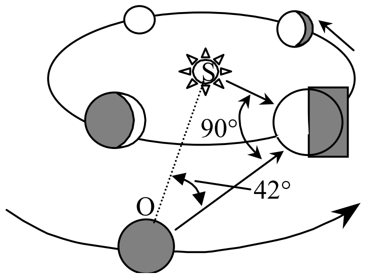


Figura 1. 55

b. Informații obținute prin observarea fazelor aştrilor

Să recapitulăm şi să completăm imaginea fluxului de date care pot rezulta din observarea fazelor unui astru, însoțită - eventual - de alte observații:

1) planul Soare-astru-Pământ este perpendicular pe axa mare a terminatorului aparent; el poate fi definit în spațiu de observator cu ajutorul a două drepte pe care observatorul le "controlează": direcția Pământ-astru şi perpendiculara ridicată din centrul aparent al astrului pe direcția axei mari a terminatorului aparent;

2) unghiul dintre direcțiile astru-Pământ şi astru-Soare poate fi determinat imediat, dacă măsurăm (pe orice imagine) cele două semiaxe ale terminatorului aparent; raportul dintre semiaxa mică şi cea mare este chiar cosinusul unghiului amintit;

3) în particular, la primul şi ultimul *pătrar* acest unghi este drept, deci triunghiul Pământ-astru-Soare este dreptunghic în astru;

4) în această situație, în principiu, observatorul trebuie să poată măsura direct încă un unghi al triunghiului Soare-astru-Pământ, cel cu vârful în observator; având două unghiuri cunoscute, triunghiul este complet determinat, abstracție făcând de un factor de scară pentru laturile sale; în consecință, putem cunoaşte raportul dintre oricare două laturi ale sale sau, altfel spus, putem exprima două din distanțele respective în funcție de a treia;

5) dacă una din laturile triunghiului Soare-astru-Pământ se poate determina din alte măsurători, şi celelalte două vor rezulta imediat;

6) măsurători ale unghiului Pământ-Lună-Soare, la primul şi ultimul *pătrar*, au fost efectuate încă din antichitate dar, dată fiind disproporția dintre distanțele Pământ-Lună şi Lună-Soare, acest unghi este apropiat de 90° şi nu a putut fi determinat de la început cu o precizie satisfăcătoare; o determinare apropiată de realitate duce la concluzia că Soarele se află cam de 400 de ori mai departe de Pământ decât Luna;

7) faptul că, de-a lungul întregului ciclu al fazelor Lunii, diametrul aparent (unghiular) al acesteia nu se modifică în mod sensibil - cel puțin în limita percepției curente - arată că Luna se mişcă

în jurul Pământului pe o traiectorie aproximativ circulară; acelaşi lucru se poate spune şi despre Soare;

8) din existența unei elongații *maxime* pentru planetele Venus şi Mercur, se poate trage concluzia că aceste planete se mişcă în jurul Soarelui, pe traiectorii aflate între Soare şi Pământ; măsurarea elongațiilor maxime ale acestor planete a permis determinarea distanțelor de la Soare la aceste planete în funcție de distanța Soare-Pământ, care s-a constituit, astfel în "*unitatea astronomică*" (u.a.) pentru distanțele din sistemul Solar;

9) această metodă de determinare a distanțelor nu poate fi aplicată în cazul planetelor "exterioare" (aflate dincolo de orbita Pământului) deoarece, dată fiind distanța mare la care se află ele de Soare (şi de Pământ!), nu prezintă unui observator terestru faze sensibile.

Probleme

Problema 1.2.14. Cunoscând perioada de variație completă a unghiului Pământ-Lună-Soare (29^z12^h), calculați viteza medie de variație a acestui unghi, exprimată în °/zi; calculați apoi care este valoarea unghiului respectiv atunci când Luna are etatea de 4 zile. Luând raza aparentă a Lunii egală cu unitatea, calculați, pentru acelaşi moment, semiaxa mică a terminatorului aparent al Lunii. Desenați secera Lunii pentru momentul respectiv, utilizând metoda descrisă în **1.2.4.a** (fig.1.28 şi 1.29). Scrieți programele corespunzătoare acestor operații, în Logo, Pascal, Fortran sau C; ciclând secvențele respective, scrieți un program care să reprezinte pe ecran fazele Lunii, cu un pas oarecare (o zi, două zile etc.).

Problema 1.2.15. Încercați să descrieți *fazele Pământului* văzut de un observator de pe Lună; dați o explicație faptului că *lumina cenuşie* a Lunii se poate vedea doar imediat după *Luna nouă.*

Partea a II-a

MODELAREA MATEMATICĂ A FENOMENELOR CEREŞTI

Motto:

Universul ... este scris
într-o limbă matematică
şi caracterele sunt triunghiuri,
cercuri şi alte figuri geometrice,
mijloace fără de care ar fi cu neputinţă
să înţelegem ceva.

Galileo Galilei

CUPRINS:

Cap. 2.3 TIMPUL ASTRONOMIC

Cap. 2.4 SISTEME DE REFERINŢĂ ASTRONOMICE

Capitolul 2.1

GEOMETRIA SISTEMELOR DE REFERINȚĂ

2.1.1 Sisteme carteziene; coordonate

a. Sisteme de referință şi coordonate în plan

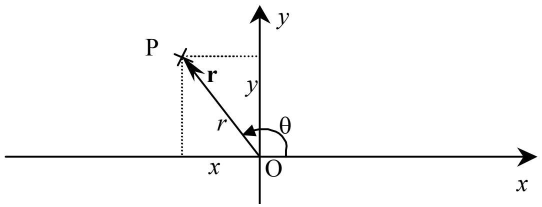


Figura 2. 1

Considerăm, pentru început, problema localizării unui punct în plan (fig. 2.1); localizarea punctului P față de un punct-origine O se poate face prin intermediul "*vectorului de poziție*" **r**. Definirea poziției punctului P este, deci, echivalentă cu definirea elementelor vectorului său de poziție, **r**.

Originea acestui vector este, evident, O, dar definirea "orientării" sale mai face necesară existența unui obiect de referință. Acesta poate fi o "axă" ce trece prin O, având o orientare - matematic - arbitrară, dar a cărei alegere este condiționată fizic de existența şi posibilitatea de observare a unor obiecte "de referință".

Axa aleasă, fiind de multe ori "direcția" de la origine la un obiect fizic sau matematic, ea poate fi numită "*direcție de referință"* a sistemului.

Vectorul de poziție **r** poate fi definit prin lungimea sa ("*raza vectoare*" *r*) şi unghiul de orientare (θ), dintre vectorul de poziție şi direcția de referință. Unghiul de orientare poate lua, evident, valori cuprinse în intervalul [0°, 360°). Aceste numere, care permit localizarea unui punct în plan, se numesc "*coordonate polare*" (fig. 2.1).

Dacă se consideră sistemul de referință cartezian format din direcția de referință şi normala acesteia, vectorul de poziție poate fi definit prin "componentele" sale, adică prin proiecțiile sale pe cele două axe (fig. 2.1).

Legătura dintre coordonatele carteziene (x , y) şi cele polare (r, θ) este dată de:

$$\begin{aligned} x &= r \cdot \cos\theta \\ y &= r \cdot \sin\theta \end{aligned} \qquad (2.1)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$
$$\sin\theta = \frac{y}{r}, \quad \cos\theta = \frac{x}{r} \qquad (2.1')$$

Deşi - după cum arată relaţiile de mai sus - din punct de vedere matematic cele două tipuri de coordonate sunt echivalente, din punct de vedere al unui "observator" situat în O este mai convenabilă utilizarea coordonatelor polare. Aceasta deoarece, chiar dacă nu este cunoscută raza vectoare r (distanţa până la punctul P), cunoaşterea unghiului de orientare θ - deşi nu defineşte complet poziţia lui P - permite "observarea" punctului respectiv; această calitate este şi mai preţioasă în cazul sistemelor de referinţă din spaţiu.

b. Sisteme de referinţă şi coordonate în spaţiu

În spaţiu (fig. 2.2), sistemul de referinţă cartezian este format din trei axe rectangulare. De obicei, se preferă sistemele cu orientarea numită "dreaptă" ("*dextrorsum*"), care satisfac regula burghiului[1].

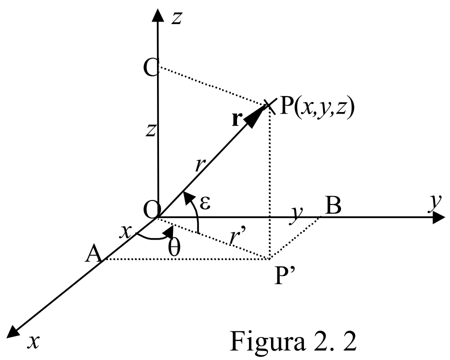


Figura 2. 2

Practic, din motive de natură fizică, elementele sistemului de referinţă se aleg în mod "ierarhizat"; în funcţie de fenomenele sau obiectele care permit materializarea cea mai eficientă a sistemului.

[1] Drept axă Oy se alege normala la Ox, iar sensul pozitiv al axei Oz - perpendiculară pe celelalte două - este identic cu sensul de înaintare al unui care, orientat de-a lungul acestei axe, este rotit în sens trigonometric direct.

Astfel, după alegerea originii, în multe cazuri se impune atenției un "*plan fundamental*" care trece prin origine; în acest plan se alege în mod convenabil o direcție de referință care devine axă a absciselor. A doua axă este normala direcției de referință, iar a treia axă rezultă apoi automat, astfel încât sistemul rezultat să aibă orientarea dorită, adică să fie *dextrorsum*.

În alte situații, elementul fundamental poate fi o *axă* ce trece prin origine şi care caracterizează un fenomen fundamental din domeniul de interes (de exemplu, o mişcare de rotație); această axă se impune ca "*axă"* a sistemului de referință, iar planul celorlalte două axe este un element derivat. De obicei, axa respectivă este aleasă ca axă O*z* a sistemului cartezian, iar celelalte două se aleg în mod convenabil, pentru definirea completă a sistemului cartezian.

Vectorul de poziție **r** al unui punct P este determinat, în spațiu, de trei coordonate *sferice*: *raza vectoare* r, *unghiul de orientare* θ şi *unghiul de elevație* ε (fig. 2.2), sau de componentele - *coordonatele* - sale *carteziene* (*x* , *y* şi *z*). Unghiul ε poate lua valori cuprinse între -90° şi +90°, iar unghiul θ ia valori cuprinse între 0° şi 360°.

Formulele care permit trecerea de la coordonatele carteziene la cele sferice sunt:

$$\begin{aligned} x &= r \cdot \cos\varepsilon \cdot \cos\theta \\ y &= r \cdot \cos\varepsilon \cdot \sin\theta \\ z &= r \cdot \sin\varepsilon \end{aligned} \tag{2.2}$$

$$\begin{aligned} & r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad , \quad r' = \sqrt{x^2 + y^2} \\ & \operatorname{tg}\varepsilon = \frac{z}{r'} \;, \quad \sin\theta = \frac{y}{r'} \;, \quad \cos\theta = \frac{x}{r'} \end{aligned} \tag{2.2'}$$

Reamintim, din calculul vectorial, definiția produsului scalar a doi vectori, precum şi relația de calcul a acestuia pe baza componentelor carteziene ale celor doi vectori (evident, ne referim la vectorii de poziție a două puncte, păstrând şi notațiile de până acum):

$$\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2 = r_1 r_2 \cos\alpha = x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2 \quad ,$$

unde α este unghiul dintre cei doi vectori de poziție; de aici, evident, rezultă o modalitate simplă de a calcula unghiul a doi vectori de poziție, prin relația:

$$\cos\alpha = (x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2) / (r_1 r_2).$$

Efectuând calculele pe baza relațiilor (2), obținem imediat:

$$\cos\alpha = \cos\varepsilon_1 \cos\theta_1 \cos\varepsilon_2 \cos\theta_2 + \cos\varepsilon_1 \sin\theta_1 \cos\varepsilon_2 \sin\theta_2 + \sin\varepsilon_1 \sin\varepsilon_2$$

$$= \sin\varepsilon_1 \sin\varepsilon_2 + \cos\varepsilon_1 \cos\varepsilon_2 \cos(\theta_2 - \theta_1)$$

c. Sistemul de referință geografic

Fără îndoială, cel mai răspândit sistem de referință utilizat de oameni este sistemul de referință geografic; asta nu înseamnă, desigur, că toată lumea cunoaște substratul matematic al acestui sistem, sau măcar semnificația coordonatelor geografice atât de des folosite.

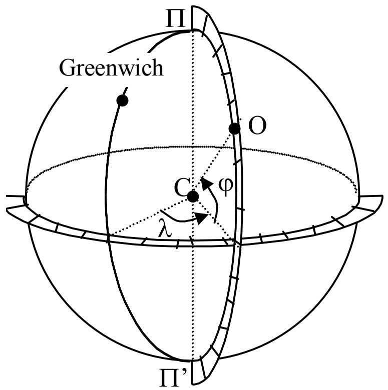


Figura 2. 3

Vom preciza, deci, cele două noțiuni care ar trebui să fie bine cunoscute din geografie (fig. 2.3): *longitudinea* şi *latitudinea* unui loc de pe suprafața Pământului.

Vom considera, pentru simplificare, că Pământul este sferic; admitem că acesta se roteşte continuu în jurul unei axe care trece prin centrul său şi, deci, intersectează suprafața sa în două puncte diametral opuse numite "*poli geografici*".

Orice plan care include axa Pământului se numeşte *plan meridian*. Cum o dreaptă şi un punct determină (definesc) un plan, rezultă că prin orice punct al suprafeței terestre trece un plan meridian şi numai unul. Excepție fac cei doi poli geografici, prin care trec *toate* planele meridiane terestre.

Fiind dat un punct de pe suprafața Pământului, vectorul său de poziție este tocmai raza terestră care ajunge în acel punct, orientată *dinspre* centrul Pământului spre exteriorul acestuia (fig. 2.3). Evident, acest vector de poziție este *inclus* în planul meridianului punctului respectiv.

> Se numeşte *longitudine geografică* (λ) a unui loc *unghiul format de planul meridian al acelui loc cu planul meridian al localității Greenwich*.

> Se numeşte *latitudine geografică* (φ) a unui *loc unghiul format de vectorul de poziție al locului respectiv cu planul ecuatorial terestru*[1].

"Rețeaua" de meridiane şi paralele trasată pe orice "glob pământesc" permite citirea rapidă a valorilor unghiurilor; aceste meridiane şi paralele trasate pe globurile pământeşti sunt, de fapt, nişte "raportoare" cu ajutorul cărora se pot citi cele două unghiuri, pentru orice punct de pe suprafața Pământului. Evident, în ipoteza Pământului sferic, razele vectoare ale tuturor punctelor de pe scoarța terestră au aceeaşi valoare, cea a razei Pământului.

Definițiile de mai sus, formulate *ex abrupto*, prezintă dezavantajul că nu explicitează sistemul de referință utilizat;

> *Sistemul de referință geografic* este un sistem de referință *geocentric* (cu *origina* în centrul Pământului), având ca *axă* axa de rotație a Pământului, iar ca plan de referință planul meridianului localității Greenwich. Evident, planul fundamental este planul ecuatorului terestru, care trece prin centrul Pământului şi este perpendicular pe axa sistemului.

Cu aceste precizări, este evident că *longitudinea* unui punct este *unghiul de orientare* al acelui punct, iar *latitudinea* este *unghiul de elevație* al punctului respectiv, **în sistemul de referință geografic**.

În încheierea acestor scurte precizări, vom mai face una: determinarea "*pe teren*" a coordonatelor geografice ale unui punct este

---

[1] În cazul Pămîntului sferic, vectorul de poziție are acelaşi suport cu normala la suprafața Pământului; dacă se consideră Pământul nesferic, latitudinea se defineşte cu ajutorul normalei, nu al vectorului de poziție; în această lucrare, însă, adoptăm modelul sferic.

o problemă de ... astronomie. Acest lucru va deveni evident, însă abia după ce vom analiza sistemele de referinţă astronomice şi relaţia lor cu sistemul de referinţă geografic.

Probleme

Problema 2.1.1 Luând ca unitate de măsură raza Pământului, calculaţi coordonatele carteziene (rectangulare) ale unui punct de pe scoarţa terestră cu coordonatele $\lambda = 45°$ şi $\varphi = +45°$. În aceleaşi condiţii, calculaţi distanţa de la acel punct la axa de rotaţie a Pământului. Care este raza paralelului geografic al punctului respectiv?

Problema 2.1.2 Să se calculeze distanţa dintre două puncte terestre cu coordonate geografice cunoscute, în ipoteza Pământului sferic.

2.1.2 Schimbarea sistemului de referinţă

a. Schimbarea sistemului de referinţă în plan

Deoarece - de multe ori - studiul fenomenelor dinamice impune utilizarea mai multor sisteme de referinţă, este necesar să dispunem de posibilitatea "trecere" de la un sistem la altul. Cu alte cuvinte, trebuie să putem calcula coordonatele unui punct faţă de un sistem de referinţă "nou" când se cunosc coordonatele punctului faţă de un alt sistem de referinţă, "vechi".

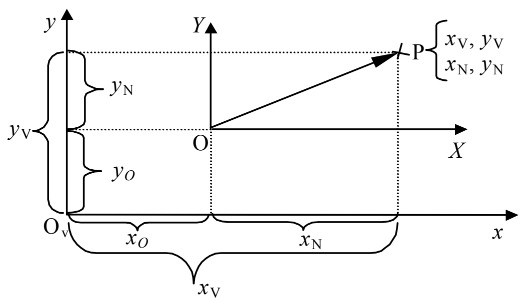


Figura 2.4

În cazul unei translaţii (fig. 2.4), relaţiile care dau coordonatele noi x_N şi y_N ale unui punct oarecare, cunoscând coordonatele sale vechi (x_V, y_V) şi poziţia noii origini (x_O , y_O) sunt:

$$x_N = x_V - x_O$$
$$y_N = y_V - y_O \qquad (2.3)$$

În cazul în care cele două sisteme au aceeaşi origine, poziția noului sistem de referință față de cel vechi este determinată (fig. 2.5) prin *unghiul rotației* (ω), care "duce" axa O*x* "veche" peste cea "nouă".

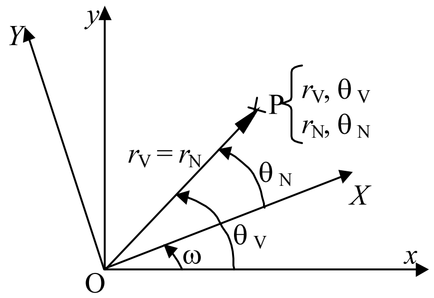


Figura 2.5

Relațiile dintre coordonatele polare vechi şi cele noi, în cazul rotației din plan sunt evidente:

$$r_N = r_V \ , \quad \theta_N = \theta_V - \omega \qquad (2.4)$$

Apoi, relațiile (2.1) dintre coordonatele carteziene (*x,y*) şi cele polare (*r,*θ *)*, împreună cu formulele rotației scrise pentru coordonatele polare, permit găsirea relațiilor care exprimă legătura dintre coordonatele carteziene vechi şi cele noi:

$$x_N = r \cdot \cos\theta_N = r \cdot \cos(\theta_V - \omega) = r \cdot (\cos\theta_V \cdot \cos\omega + \sin\theta_V \cdot \sin\omega) =$$
$$= (r \cdot \cos\theta_V) \cdot \cos\omega + (r \cdot \sin\theta_V) \cdot \sin\omega = x_V \cdot \cos\omega + y_V \cdot \sin\omega$$

şi analog pentru y_N.

În final, obținem relațiile:

$$x_N = x_V \cdot \cos\omega + y_V \cdot \sin\omega$$
$$y_N = -x_V \cdot \sin\omega + y_V \cdot \cos\omega \qquad (2.5)$$

Evident, orice schimbare a sistemului de referință din plan poate fi descompusă într-o translație, urmată de o rotație (fig. 2.6).

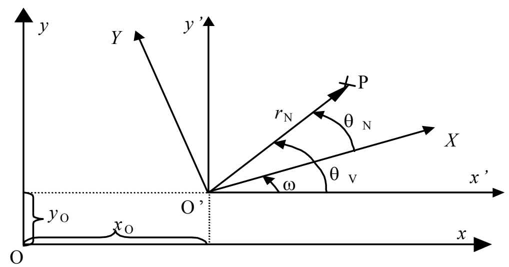


Figura 2.6

b. Schimbarea sistemului de referință în spațiu

O translație a sistemului de referință din spațiu produce o modificare a coordonatelor conform cu relațiile:

$$x_N = x_V - x_O$$
$$y_N = y_V - y_O \qquad (2.6)$$
$$z_N = z_V - z_O$$

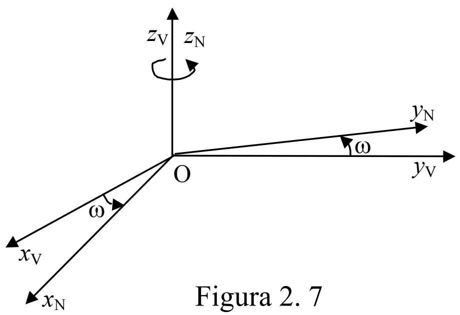


Figura 2. 7

Rotația sistemului, *în jurul uneia din axele sale*, nu schimbă coordonata corespunzătoare axei respective şi se numeşte "*rotație axială"* (fig. 2.7); celelalte două coordonate se modifică, evident, după formulele rotației din planul respectiv.

Pentru a trece la prezentarea rotației oarecari în spațiu, vom remarca faptul că, de regulă, noul plan fundamental diferă, datorită rotației sistemului, de vechiul plan fundamental. În Astronomie, prin tradiție, dreapta după care planul fundamental nou se intersectează cu cel vechi se numeşte "*linia nodurilor*"[1] (fig. 2.8). Poziția acestei drepte este fixată de unghiul Ω pe care ea îl formează cu axa Ox_V.

Poziția noului plan fundamental este complet determinată dacă se cunoaşte, în plus, unghiul *i* dintre planele fundamentale ale celor două sisteme.

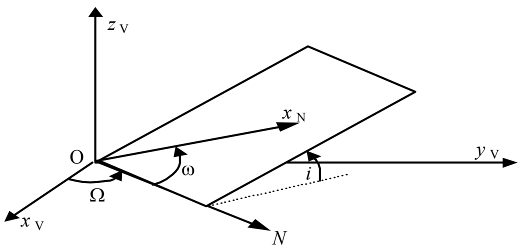


Figura 2. 8

Poziția noului sistem de referință este complet precizată dacă se mai cunoaşte un element unghiular, unghiul (ω) dintre noua axă Ox_N şi dreapta de intersecție a planelor fundamentale.

[1] Dacă planele respective trec prin centrul sferei cereşti, ele intersectează sfera după nişte "cercuri mari"; *nodurile* sunt cele două puncte (diametral opuse) de pe sfera cerească, în care cercurile mari respective se intersectează.

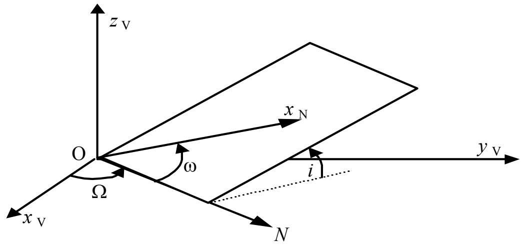


Figura 2. 8

Măsurile celor trei unghiuri de mai sus ("*unghiurile lui Euler*") constituie parametrii unei rotații în spațiu. Trecerea inversă, de la sistemul de coordonate nou la cel vechi, se face inversând ordinea şi sensurile rotațiilor axiale (semnele unghiurilor).

Orice rotație a sistemului de referință poate fi descompusă în *trei rotații axiale* consecutive, după cum urmează: o rotație de unghi Ω în jurul axei O*z*, o rotație de unghi i în jurul axei O*x* şi o rotație de unghi ω în jurul axei O*z*[1].

Rotația axială de unghi Ω în jurul axei O*z* se face cu formulele:

$$\begin{aligned} x' &= x_V \cdot \cos\Omega + y_V \cdot \sin\Omega \\ y' &= -x_V \cdot \sin\Omega + y_V \cdot \cos\Omega \\ z' &= z_V \end{aligned} \tag{2.7}$$

Rotația de unghi i în jurul axei Ox se face cu formulele:

$$\begin{aligned} x'' &= x' \\ y'' &= y' \cdot \cos i + z' \cdot \sin i \\ z'' &= -y' \cdot \sin i + z' \cdot \cos i \end{aligned} \tag{2.8}$$

Rotația de unghi ω în jurul axei O*z* se face cu formulele:

$$\begin{aligned} x_N &= x'' \cdot \cos\omega + y'' \cdot \sin\omega \\ y_N &= -x'' \cdot \sin\omega + y'' \cdot \cos\omega \\ z_N &= z'' \end{aligned} \tag{2.9}$$

[1] De fiecare dată, este vorba de ultima "ipostază" a axei respective.

Relațiile (2.7 – 2.9) reprezintă chiar *formulele rotației în spațiu*; ele pot fi "comasate", prin substituții succesive, după cum urmează:

$$
\begin{aligned}
x_N &= A_x\, x_V + B_x\, y_V + C_x\, z_V \\
y_N &= A_y\, x_V + B_y\, y_V + C_y\, z_V \\
z_N &= A_z\, x_V + B_z\, y_V + C_z\, z_V
\end{aligned}
\tag{2.10}
$$

unde A_x, B_x, C_x, A_y, B_y, C_y, A_z, B_z, C_z reprezintă *coeficienții* formulelor rotației. Acești parametrii sunt determinați de unghiurile Ω, i și ω, conform expresiilor (obținute prin substituirea în (2.9) a valorilor date de (2.8) și (2.7)):

$$
\begin{aligned}
A_x &= \cos\Omega \cos\omega - \sin\Omega \sin\omega \cos i \\
B_x &= \sin\Omega \cos\omega + \cos\Omega \sin\omega \cos i \\
C_x &= \sin\omega \sin i \\
A_y &= -\cos\Omega \sin\omega - \sin\Omega \cos\omega \cos i \\
B_y &= -\sin\Omega \sin\omega + \cos\Omega \cos\omega \cos i \\
C_y &= \quad \cos\omega \sin i \\
A_z &= \quad \sin\Omega \sin i \\
B_z &= -\cos\Omega \sin i \\
C_z &= \quad \cos i
\end{aligned}
\tag{2.11}
$$

După cum arată acest calcul direct, coordonatele noi obținute în urma unei rotații sunt *funcții liniare* de coordonatele vechi.

Deoarece rotația este determinată de numai *trei* parametrii independenți (Ω, i, ω) rezultă că coeficienții A_x, B_x, C_x etc. nu pot fi independenți; acest fapt este evident și deoarece toți cei nouă coeficienți sunt exprimați prin aceeași trei parametrii inițiali (Ω, i, ω).

Eliminând acești parametrii inițiali între coeficienții A_x, B_x, C_x etc., pot fi formulate următoarele șase relații directe:

$$
\begin{aligned}
&A_x^{\,2} + B_x^{\,2} + C_x^{\,2} = 1 \\
&A_y^{\,2} + B_y^{\,2} + C_y^{\,2} = 1 \\
&A_z^{\,2} + B_z^{\,2} + C_x^{\,2} = 1 \\
&A_x\ A_y + B_x\ B_y + C_x\ C_y = 0 \\
&A_y\ A_z + B_y\ B_z + C_y\ C_z = 0 \\
&A_z\ A_x + B_z\ B_x + C_z\ C_x = 0
\end{aligned}
\qquad (2.12)
$$

Coeficienții formulelor rotației formează o *matrice pătrată* cu trei linii şi trei coloane, numită "*matricea de rotație*" a schimbării sistemului de referință. Relațiile (2.12) arată că această matrice este "*ortonormală*".

Dacă vom nota componentele vechi ale vectorului de poziție cu x_i ($i = 1, 2, 3$), iar componentele noi le vom nota cu x'_i (i = 1, 2, 3), avem:

$$
\mathrm{X'} = \mathrm{A} \cdot \mathrm{X} \ , \qquad (2.13)
$$

unde

$$
\mathrm{X} = \left\| \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{matrix} \right\|, \quad \mathrm{A} = \left\| \begin{matrix} A_x & B_x & C_x \\ A_y & B_y & C_y \\ A_z & B_z & C_z \end{matrix} \right\|, \quad \mathrm{X'} = \left\| \begin{matrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \end{matrix} \right\| \ . \qquad (2.14)
$$

Capitolul 2.2

ORGANIZAREA SFEREI CEREŞTI

2.2.1 Elementele locului de observare

a. Verticala locului, planul orizontal şi planul meridian

Revenim la sfera cerească a unui observator uman, sferă al cărei centru se află în locul de observare şi pe care observatorul proiectează toate obiectele din Univers.

Primul element geometric care poate fi pus în evidenţă - cu ajutorul "*firului cu plumb*" - într-un loc de observare este "*verticala locului*"; ea reprezintă normala la suprafaţa ideală a Pământului (fig.2.9). Deoarece suprafaţa ideală a Pământului nu este sferică, verticala locului nu trece exact prin centrul Pământului, dar este coplanară cu axa de rotaţie a acestuia şi o intersectează într-un punct situat în apropierea centrului; în cele ce urmează vom neglija această nesfericitate a Pământului, ea nefiind esenţială pentru problemele tratate.

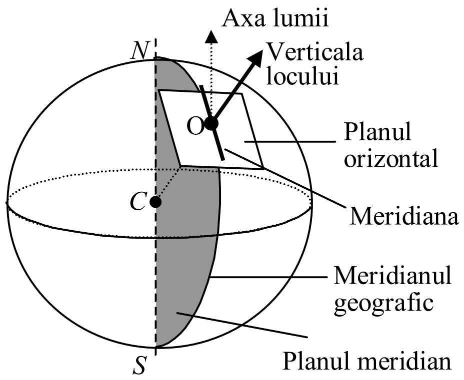


Figura 2. 9

Prin urmare, vom considera că *verticala locului trece prin centrul Pământului*; pe verticala locului, orice observator defineşte două sensuri: "*în jos*", adică spre centrul Pământului, şi cel contrar, "*în sus*".

"*Planul orizontal*" al unui loc este planul perpendicular pe verticala locului şi reprezintă planul tangent la suprafaţa ideală a

Pământului în acel loc; acest element are sens numai pentru puncte de pe suprafața Pământului sau a unei planete.

"*Planul meridian*" al unui punct reprezintă planul care trece prin axa de rotație a Pămîntului şi prin punctul respectiv; acest element are sens pentru orice punct din spațiu, cu excepția celor de pe axa Pământului.

Planul meridian *include* verticala locului. El intersectează suprafața ideală a Pământului determinând "*meridianul geografic*" al locului. Intersecția planului meridian al unui loc cu planul orizontal al acelui loc este o dreaptă care se numeşte "*meridiana*" locului (fig. 2.9).

Dacă planul orizontal al locului este complet determinat (definit) cu ajutorul verticalei locului, pentru planul meridian nu cunoaştem decât o dreaptă (verticala locului); dacă am putea determina meridiana locului, am dispune de o a doua dreaptă din acest plan şi el ar fi complet determinat. Vom vedea ceva mai jos cum se poate realiza acest lucru.

Revenind la planul orizontal, să amintim că el împarte întreg spațiul în două zone; cea "de deasupra orizontului", care nu include Pământul, şi cea "de dedesupt". Evident, numai zona spațială de deasupra planului orizontal permite observarea obiectelor pe care le cuprinde, în timp ce obiectele aflate în zona spațială de sub planul orizontal nu sunt vizibile, din cauza opacității Pământului.

Mişcarea de rotație a Pămîntului în jurul axei sale determină o permanentă schimbare a poziției planului orizontal al locului. Acest fapt conduce la modificarea celor două zone spațiale pe care le determină planul orizontal, ceea ce modifică în mod continuu domeniul spațial accesibil observatorului.

b. Axa lumii

Dreapta paralelă cu axa de rotație a Pământului (fig. 2.9), dusă din locul de observare, se numeşte "*axa lumii*" (pentru locul respectiv);

Denumirea este justificată de faptul că, *datorită efectului de perspectivă*, cele două drepte par a se întâlni ("la infinit), iar observatorul antrenat de mişcarea de rotație a Pământului are impresia că "lumea" se mişcă în jurul acestei axe (fig. 2.10).

Axa lumii, trecând prin centrul sferei cereşti, intersectează această sferă în două puncte diametral opuse, numite *poli cereşti*; polul ceresc aflat în aceeaşi direcţie cu polul nord geografic se numeşte *pol nord ceresc*.

Deşi încă nu este clar cum, se poate întrevedea că prin observarea atentă a aspectului cerului nocturn se poate determina poziţia axei lumii, respectiv a polilor cereşti; dacă observatorul reuşeşte această determinare, el va putea determina poziţia planului meridian al locului (prin verticala locului şi axa lumii!).

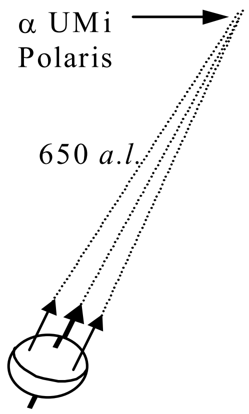


Figura 2. 10

Întâmplarea face ca în apropierea polului ceresc nord să se afle o stea de strălucire medie, α UMi, numită şi "Steaua Polară"; fiind "practic" pe axa lumii, această stea nu se deplasează deloc pe cerul observatorului din emisfera nordică, oriunde s-ar afla acesta. Cel care ştie să găsească această stea pe cer poate găsi, implicit, axa lumii pentru locul respectiv de observare.

2.2.2 Elementele sferei cereşti

a. Elemente ale locului de observare aflate pe sfera cerească

Mai multe elemente geometrice legate de locul de observare sunt situate ... pe sfera cerească; totuşi, ele nu participă la mişcarea aparentă, diurnă (zilnică) a sferei cereşti.

Verticala locului intersectează sfera cerească în două puncte diametral opuse (fig. 2.11) numite *zenit* (Z) şi *nadir* (Z').

Planul orizontal al locului de observare intersectează sfera cerească după un "cerc mare" numit "*orizontul locului*".

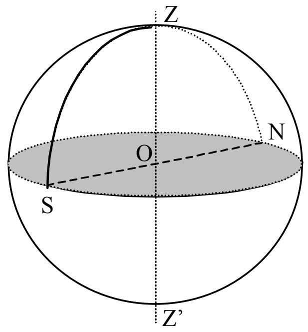


Figura 2. 11

Pe de altă parte, planul meridian al locului intersectează sfera cerească după un cerc mare numit "*meridianul locului*". Acesta mai este numit şi "meridianul *ceresc* al locului", atunci când contextul poate produce o confuzie cu "meridianul geografic" al locului sau cu "planul meridian" al acestuia.

Zenitul şi nadirul se află pe meridianul locului, deoarece verticala locului este inclusă în planul meridian al locului.

Meridiana locului intersectează sfera cerească în două puncte diametral opuse numite *puncte cardinale* Nord (N) şi Sud (S), deoarece meridiana locului indică direcţia N-S a locului.

Punctele cardinale N şi S sunt punctele de intersecţie ale celor două cercuri mari de pe sfera cerească; orizontul locului şi meridianul locului. Deci, meridianul locului este cercul mare al sferei cereşti care trece prin zenitul locului şi punctele cardinale N şi S.

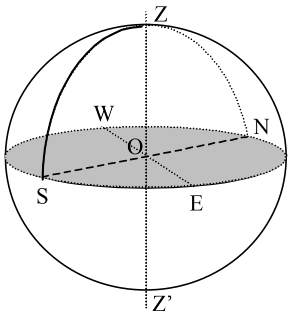


Figura 2. 12

Dacă ducem din centrul O al sferei cereşti o perpendiculară pe meridiana NS a locului, ea intersectează sfera cerească în două puncte diametral opuse, situate pe orizont şi numite *puncte cardinale* Est (E) şi Vest (W). Planul care trece prin punctele Z, E, W include şi el verticala locului, la fel ca planul meridian (fig. 2.12).

b. Înălţimea unui astru

Orice plan care include verticala locului se numeşte *plan vertical*, iar intersecţia unui plan vertical cu sfera cerească este un cerc mare al sferei cereşti numit "*cerc vertical*" sau *vertical*. De multe ori se vorbeşte despre "verticalul" sau "cercul vertical" al unui astru; aceasta, deoarece dacă se cunosc două puncte ale unui cerc mare (zenitul şi astrul), atunci

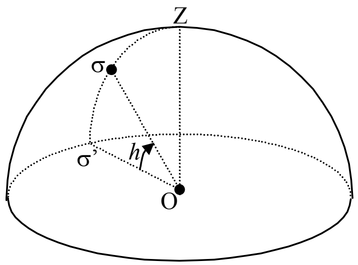


Figura 2. 13

acest cerc este complet determinat (fig. 2.13).

Evident, planul orizontal al unui loc se impune atenției ca un posibil plan fundamental pentru un sistem de referință *topocentric* (cu originea în locul de observare); deşi vom trata mai târziu această posibilitate, vom menționa de pe acum că unghiul de elevație al unui astru, într-un astfel de sistem, se va măsura chiar *în planul vertical* al astrului respectiv. Acest unghi de elevație se numeşte "*înălțimea*" astrului (deasupra orizontului).

c. Teorema fundamentală a astronomiei topocentrice

Să considerăm acum un punct de pe suprafața Pământului şi să reprezentăm situația din planul meridian al acestui punct (fig. 2.14): C este centrul Pământului, NS este axa de rotație a acestuia, iar CO (OZ) este verticala locului. O'O" este meridiana locului de observare, deci intersecția planului meridian cu cel orizontal, iar EE' este intersecția planului meridian cu planul ecuatorului terestru.

Axa lumii pentru un observator terestru, fiind o dreaptă care trece prin locul de observare şi este paralelă cu axa de rotație a Pământului, este inclusă, de asemenea, în acest plan.

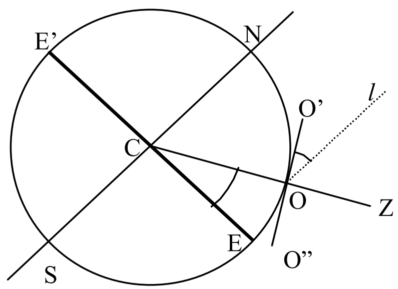


Figura 2. 14

Fie OL (∥ SN) axa lumii pentru observatorul O din figura 2.14. Cum planul figurii (planul meridian al observatorului) este perpendicular pe planul orizontal, rezultă că unghiul ∠ O'OL este tocmai *înălțimea polului* nord ceresc deasupra orizontului locului; el este un unghi constant, dacă axa Pământului rămâne cu orientarea neschimbată.

Cum OL ∥ SN şi SN ⊥ EE', rezultă că OL ⊥ EE', adică OL ⊥ CE. Pe de altă parte, se ştie că OO' ⊥ CO ; cum OL ⊥ EE', rezultă că

$$\angle O'OL \equiv \angle ECO,$$

deoarece au laturile respectiv perdendiculare.

Dar unghiul $\angle$ ECO este tocmai *latitudinea geografică* a observatorului din O; prin urmare

$$\angle O'OL = \varphi$$

Prin cele de mai sus, am demonstrat următoarea **teoremă:**

Înălțimea polului ceresc Nord al unui observator terestru este egală cu latitudinea geografică a locului de observare.

Pe baza teoremei de mai sus devine posibilă introducerea elementelor caracteristice sferei cereşti topocentrice şi, apoi, analiza fenomenelor observabile de către observatorul aflat pe suprafața Pământului. Din acest motiv, teorema de mai sus este numită "teorema fundamentală a astronomiei topocentrice".

Dar, înainte de a trece la "exploatarea" acestui rezultat, ne vom îndrepta atenția asupra timpului astronomic, dat fiind că fenomenele cereşti se desfăşoară *în timp*, regularitatea lor fiind chiar principalul fundament pe care omul şi-a clădit conceptul general de timp.

Capitolul 2.3

TIMPUL ASTRONOMIC

2.3.1 Măsurarea timpului prin mijloace astronomice

a. Trecerea la meridian, consecință a rotației Pământului

Pentru a putea măsura timpul este necesară stabilirea *unității de măsură* precum şi stabilirea *originii timpului*, adică a momentului de început al cronologiei.

Unitatea de măsură poate fi durata unui fenomen natural care se repetă periodic în mod uniform. *Rotația Pământului* (sau mişcarea aparentă diurnă a aştrilor datorată rotației Pământului în jurul axei sale) este tocmai un astfel de fenomen natural, care se repetă periodic, în mod uniform, satisfăcând - în primă aproximație - condițiile necesare pentru a sta la baza măsurării timpului.

Pentru a descrie matematic acest fenomen, utilizăm câteva elemente geometrice caracteristice *locului de observare* şi *obiectului observat* (în cazul nostru sfera cerească). Acestea au fost definite în capitolul precedent.

Se ştie că planul meridian al unui observator O este planul care trece prin axa Pământului şi prin observatorul respectiv; analog, planul meridian al unui astru σ trece prin axa Pământului şi prin astrul respectiv.

Datorită rotației Pământului în jurul axei sale, planul meridian al observatorului va coincide la un moment dat cu planul meridian al astrului. Această coincidență a celor două plane este numită *trecerea astrului la meridianul observatorului*. Evident, în cursul unei rotații a Pământului, orice astru trece de două ori la meridianul locului; cele două treceri se mai numesc *culminații* ale astrului. Din motive care se vor explicita în capitolul 3, culminația care are loc la sud de axa lumii se numeşte *culminație superioară*, iar cea care are loc la nord de axa lumii este numită *culminație inferioară*.

Planul meridian al observatorului poate fi determinat (materializat) prin *verticala locului* şi prin *meridiana locului* (direcția NS). Pentru observarea precisă a trecerii la meridian a aştrilor, se utilizează o lunetă (sau un alt instrument) care se instalează astfel încât să se poată roti numai în planul meridian (fig. 2.15).

În câmpul lunetei se fixează un *reticul* (o cruce din fire de păianjen) cu unul din fire situat în planul meridian, iar cu celălalt paralel cu orizontul (fig.2.16).

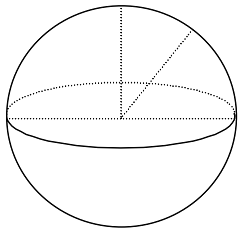


Figura 2. 15

Luneta fiind fixată, fiecare astru observat se va deplasa încet în câmp, traversând la un moment dat firul vertical al reticulului (fig. 2.16). Momentul *trecerii la meridian* a astrului este tocmai momentul în care astrul este văzut *pe* firul vertical al reticulului.

Deci, momentul trecerii unui astru la meridianul locului de observare este un eveniment care se poate observa şi înregistra cu mare precizie. Mai mult, trebuie să menţionăm că materializarea planului meridian se poate realiza şi în lipsa unei lunete, observarea trecerilor la meridian fiind realizată cu mijloace simple din cele mai vechi timpuri ale cercetărilor astronomice.

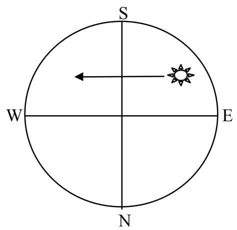


Figura 2. 16

b. Definiţia generică a timpului astronomic

Unitatea astronomică *generică* de măsură a timpului este *ziua*: ea se defineşte ca fiind *intervalul de timp dintre două culminaţii succesive de acelaşi fel ale unui astru*.

Unghiul dintre planele meridiane (PSO) şi (POσ) creşte proporţional cu trecerea timpului (fig. 2.17). Măsura acestui unghi poate fi considerată chiar ca o *măsură a timpului* scurs de la

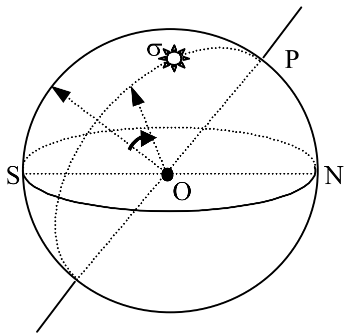


Figura 2. 17

culminația de origine a zilei respective. Pentru aceasta, se alege ca măsură a unghiurilor aşa numita *oră* cu subdiviziunile *minut* (^{m}) şi *secundă* (^{s}); avem:

$$24^h = 360° \dashrightarrow 1^h = 15° \dashrightarrow 1^m = 15'$$
$$\dashrightarrow 1^s = 15''$$

Definiția generică a timpului astronomic se poate da în felul următor:

Se numeşte timp astronomic măsura unghiului dintre planul meridian al unui obiect ceresc dat şi planul meridian al observatorului.

Ştim că măsura unghiului (diedru) dintre cele două plane este, prin definiție, măsura unghiului format de perpendicularele ridicate în cele două plane, dintr-un punct al dreptei lor de intersecție. Rezultă că unghiul celor două plane meridiane va fi tocmai unghiul razelor ecuatoriale corespunzătoare. Discuțiile legate de diferitele categorii de timp se pot baza, deci, pe studiul configurației razelor terestre ecuatoriale ale planelor meridiane ale observatorului şi astrului (fig.2.18).

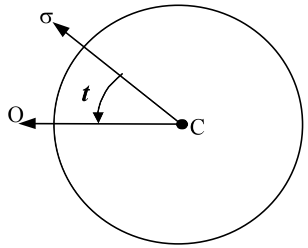


Figura 2. 18

Pe de altă parte, deoarece dimensiunile Pământului sunt neglijabile în raport cu majoritatea distanțelor cosmice, putem considera că toți observatorii se află în centrul Pământului, dar, bineînțeles, au plane meridiane diferite.

c. Consecințe imediate

Din aceste definiții rezultă câteva consecințe imediate:

1 - timpul depinde de poziția (*longitudinea*) observatorului;

2 - timpul *este acelaşi* pentru toți observatorii care au *aceeaşi longitudine* (sunt situați în acelaşi plan meridian, deci pe acelaşi meridian geografic);

3 - diferența de timp dintre două observatoare este egală cu diferența longitudinilor acestora (fig. 2.19):

$$T_2 - T_1 = \lambda_2 - \lambda_1.$$

Din acest motiv, pentru a facilita calculele legate de timp, longitudinile se exprimă - şi ele - în ore (^{h}), minute (^{m}) şi secunde (^{s}) "de timp".

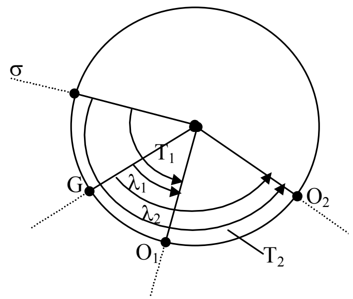


Figura 2. 19

Trebuie să subliniem că definiţiile date "*zilei astronomice*" şi "*timpului astronomic*" au un caracter general (sau *generic*); în practică, aceste definiţii trebuie să fie completate cu *specificarea obiectului ceresc* de referinţă utilizat în definiţia respectivă. De aceea, în practică se utilizează mai multe categorii de timp astronomic; ca exemple putem cita *timpul sideral*, *timpul solar*, *timpul solar mediu* etc. Din acestea, derivă apoi *timpul civil*, *timpul legal* etc..

Pe de altă parte, timpul astronomic definit ca mai sus, depinzând de longitudinea observatorului, este un *timp local*.

2.3.2 Timpul sideral

Definirea unui timp astronomic porneşte de la alegerea unui anumit astru de referinţă; determinarea timpului astronomic se face în ipoteza că *astrul de referinţă este imobil în raport cu Pământul*.

Pe de altă parte, toate corpurile cosmice se află în continuă mişcare; deci, pentru ca scurgerea timpului astronomic să reflecte fidel rotaţia Pământului, este necesar ca efectul mişcării de revoluţie a Pământului şi cel al mişcării proprii a astrului să fie neglijabile în cadrul observării trecerilor la meridian.

Putem face ca aceste mişcări să aibă efecte neglijabile alegând ca astru de referinţă o stea; se ştie că stelele pot fi considerate fixe în raport cu Pământul, deoarece distanţele până la ele sunt deosebit de mari.

În principiu, timpul astronomic definit cu ajutorul unei stele ar putea fi numit *timp sideral*.

Orice stea poate fi aleasă ca astru de referinţă; a fost preferat, totuşi, un punct matematic de pe sfera cerească, *punctul vernal,* care este pe ecuatorul ceresc şi participă la mişcarea de rotație a sferei cereşti. El va fi precizat abia în capitolul următor, dar pentru discuția de aici nu este esențială cunoaşterea definiției sale. Deci,

> *Ziua siderală* este intervalul de timp scurs între două culminații superioare succesive ale punctului vernal.

În consecință,

> *Timpul sideral (local) este măsura unghiului format de planul meridian al punctului vernal cu planul meridian al observatorului*.

Din definițiile de mai sus rezultă că ziua siderală este egală cu *perioada de rotație a Pământului în jurul axei sale*.

2.3.3 Timpul solar mijlociu; relația cu timpul sideral

a. Un Soare fictiv: Soarele ecuatorial mijlociu

Deoarece Soarele este cea mai apropiată stea de Pământ, iar mişcarea sa aparentă pe cer este cea care *impune* ritmul vieții cotidiene, devine necesară definirea unui timp "*solar*", prin alegerea Soarelui ca astru de referință.

Distanța dintre Pământ şi Soare fiind mică în raport cu distanța de la Pământ la stele, nu mai putem neglija mişcarea de revoluție a Pământului, aceasta influențând inevitabil timpul solar. Implicit, acceptarea Soarelui ca astru de referință face necesară analizarea influenței mişcării de revoluție a Pământului asupra timpului solar.

Într-o primă etapă, pentru simplificarea acestei analize, vom presupune că:

a) orbita Pământului este circulară;

b) mişcarea Pământului pe orbită este uniformă;

c) axa Pământului este perpendiculară pe planul orbitei, deci planul ecuatorului terestru coincide cu planul orbitei (numit "*planul ecliptic*"). În aceste condiții, Soarele s-ar vedea de pe Pământ mereu în planul ecuatorial, fiind permanent la aceeaşi distanță de centrul Pământului.

Un "Soare" fictiv care îndeplineşte condițiile (a-c) este numit *Soare ecuatorial mijlociu (mediu)*.

Menționăm că se pot formula condiții similare şi în cazul în care se consideră că Soarele este cel care se mişcă în jurul Pământului.

Presupunând îndeplinite condițiile a - c, intervalul de timp dintre două culminații superioare ale Soarelui este *constant*, indiferent de poziția observatorului pe Pământ sau de poziția Pământului pe orbită.

b. Timpul solar mijlociu

În acest context, vom defini *ziua solară mijlocie* ca fiind *intervalul dintre două culminații superioare succesive ale* Soarelui ecuatorial mijlociu.

În continuare, se poate da următoarea definiție:

Timpul solar mijlociu este măsura unghiului format de planul meridian al Soarelui ecuatorial mijlociu cu planul meridian al observatorului.

Din cele prezentate mai sus se desprind imediat câteva concluzii de mare importanță:

- ziua solară mijlocie este *constantă*, deci poate fi luată ca unitate de măsură pentru timp;
- timpul solar mijlociu este *uniform*, bazându-se pe un fenomen riguros periodic - ziua solară mijlocie.

Un dezavantaj al timpului solar mijlociu constă în faptul că ziua solară mijlocie începe "la amiază", adică la jumătatea "zilei lumină". Acest dezavantaj se corectează trecând la un timp "*civil*", *decalat cu 12 ore fa*ț*ă de timpul solar mijlociu*; ziua civilă începe, aşadar, la ora 12 timp solar mijlociu, deci la "miezul nopții".

Dar un alt dezavantaj - major - al timpului solar mijlociu este acela că determinarea lui se bazează pe un obiect *fictiv* care nu *poate fi observat efectiv*. Acest dezavantaj dispare doar dacă suntem capabili să stabilim relația dintre mişcarea Soarelui *real* şi a celui mijlociu; relația respectivă va fi stabilită în partea următoare a cărții de față (xx v. *ecuația timpului*).

Pe de altă parte, trebuie să subliniem faptul că ziua solară *nu este* - decât foarte aproximativ - perioada de rotație a Pământului în jurul axei sale.

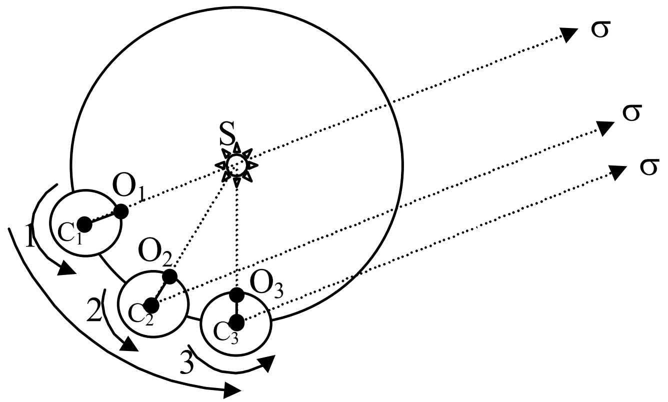


Figura 2. 20

Pentru a argumenta această afirmație, să considerăm că în poziția 1 din figura 2.20 are loc culminația superioară a Soarelui pentru observatorul O_1 şi, simultan, culminația superioară a astrului σ.

O rotație completă a Pământului se încheie la o nouă culminație superioară a astrului σ. Acesta fiind plasat - practic - la infinit, rotația se va încheia când planul meridian al observatorului va fi paralel cu poziția inițială (poziția 2, în fig. 2.20).

Dar - după cum se vede din figură - până în această poziție Pământul nu a efectuat o rotație completă față de Soare; până la o nouă culminație superioară a Soarelui, Pământul trebuie să mai execute o fracțiune de rotație, pentru a ajunge în poziția 3.

c. Relația dintre ziua solară mijlocie şi ziua siderală

Decalajul dintre o rotație completă a Pământului în raport cu Soarele şi o rotație completă în raport cu un astru σ reprezintă diferența dintre ziua solară mijlocie şi ziua siderală. Această diferență este reprezentată de măsura unghiului $SC_3\sigma$ (fig. 2.20).

Revenind la figura 2.20, observăm congruenţa unghiurilor $SC_3\sigma$ şi C_1SC_3, ca alterne interne. Deci, *diferenţa dintre ziua solară medie şi cea siderală este egală cu măsura unghiului descris de vectorul de poziţie al Pământului în decursul unei zile solare medii*.

Într-o mişcare completă de revoluţie, acest vector descrie 360° în 365,25 zile (un an), deci într-o zi el descrie un unghi de aproximativ 1°. Prin urmare, diferenţa dintre ziua solară medie şi ziua siderală este de aproximativ 4^{m} ($3^{m}\ 55^{s}.91$) de timp solar.

În consecinţă, perioada de rotaţie a Pământului, exprimată în timp solar mijlociu (sau timp civil) este de $23^{h}56^{m}04^{s}.09$.

Convenţional, zilele au fost împărţite în 24^{h}. Deci, atât ziua solară medie, cât şi ziua siderală, se împart în 24^{h} care la rândul lor se împart în 60^{m}, iar minutele în 60^{s}.

Ziua solară medie fiind mai lungă decât ziua siderală, unităţile de timp solar sunt mai mari decât unităţile de timp sideral corespunzătoare.

Rezultă că raportul dintre o unitate de timp solară medie şi cea siderală corespunzătoare este egal cu raportul dintre ziua solară medie şi ziua siderală. Pentru a determina acest raport, considerăm din nou Pământul pe orbita sa, în condiţiile (a - c), care definesc timpul solar mijlociu (fig. 2.21).

Presupunem că în poziţia 1 timpul solar şi timpul sideral sunt egale şi nule, adică Soarele şi punctul vernal γ trec la meridian simultan. În decursul unei jumătăţi de an, deci după 180º, culminaţia superioară a Soarelui coincide cu culminaţia *inferioară* a punctului vernal, la meridianul aceluiaşi observator.

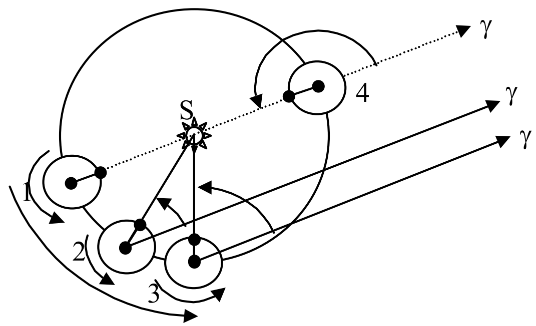


Figura 2. 21

Diferența dintre o culminație superioară și una inferioară este de o jumătate de zi; deci, după un an diferența dintre timpul solar și cel sideral este de o zi.

Anul, care are 365,2422 zile solare, va avea cu *o zi siderală mai mult*, adică 366,2422 zile siderale:

$$365{,}2422 \text{ zile solare} = 366{,}2422 \text{ zile siderale},$$

adică

$$1 \text{ zi solară} = 366{,}2422/365{,}2422 \text{ zile siderale} = \\ = 1{,}002737909228 \text{ zile siderale}$$

sau

$$1 \text{ zi siderală} = 365{,}2422/366{,}2422 \text{ zile solare} = \\ = 0{,}997269566505 \text{ zile solare.}$$

Raportul dintre măsura unui interval de timp exprimată în unități de timp solar mijlociu și măsura aceluiași interval de timp, exprimată în unități de timp sideral este, deci:

$$\chi = 1{,}002737909228$$

Raportul invers este

$$\kappa = 0{,}997269566505$$

Pentru a exprima un interval de timp solar mijlociu în unități de timp sideral, valoarea intervalului respectiv se va înmulți cu factorul χ; invers, pentru a exprima un interval de timp sideral în unități de timp mijlociu, valoarea dată a intervalului se va înmulți cu κ.

Evident, astfel de calcule, efectuate manual, sunt foarte greoaie, mai ales dacă timpul este exprimat în ore, minute și secunde și nu în fracțiuni zecimale de zile. Efectuarea lor cu calculatorul electronic este banală.

Totuși, pentru cazul în care e necesară efectuarea manuală a calculelor, s-au alcătuit tabele ajutătoare, care sunt date în anuarele astronomice. Aceste tabele conțin corecțiile care trebuie să fie *adunate* la măsura intervalelor "întregi" (ore, respectiv minute sau secunde) de timp solar mediu pentru a obține măsura lui în unități siderale; analog, există tabele de *corecții aditive* pentru transformarea inversă.

2.3.4 Timpul universal; transformări de timp

a. Timpul universal şi convenţia fuselor orare

Timpul civil local al meridianului 0 (Greenwich) se mai numeşte *timp universal* (U.T. sau G.M.T.); timpul civil local al unui observator de la longitudinea λ (fig. 2.22) se obţine astfel:

$$t_\lambda = UT + \lambda$$

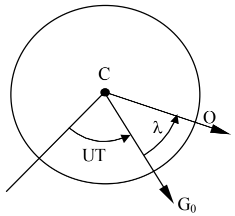


Figura 2. 22

Pentru a nu fi necesară modificarea indicaţiei ceasurilor la orice deplasare în longitudine, s-a introdus *convenţia fuselor orare*; suprafaţa Pământului a fost împărţită în 24 de fuse orare, fiecare fus întinzându-se pe 15° (1^h) în longitudine.

În principiu, *toate punctele din cadrul unui fus adoptă ora fusului respectiv*, adică ora meridianului central al fusului. Diferenţa de timp dintre două fuse alăturate este 1^h ; diferenţa de timp dintre două fuse oarecare este egală, *în ore*, cu diferenţa numerelor de ordine ale fuselor respective. Menţionăm că fusele orare sunt numerotate de la 0 la 23 ; fusul 0 are ca meridian central meridianul Greenwich.

b. Alte categorii de timp

În diferite domenii de activitate ale vieţii cotidiene, sau în astronomie, este necesară utilizarea unor categorii de timp diferite, dintre care amintim:

- timpul sideral local, t;
- timpul solar mijlociu local, t_s;
- timpul civil local, t_c;
- timpul universal, UT;
- timpul legal, t_L.

Ultimele trei categorii de timp derivă din timpul solar mijlociu şi utilizează ca unitate de măsură tot ziua solară mijlocie; mai precis:

- timpul civil local este decalat cu 12^h faţă de timpul solar mijlociu local, astfel încât ziua solară mijlocie începe la ora 12 timp civil local, iar ziua civilă 12 ore mai târziu;

- timpul universal este timpul civil local al meridianului geografic 0º (Greenwich);

- timpul legal este timpul civil al fusului orar în care intră meridianul respectiv, adică:

$$t_L = \mathrm{UT} + \mathrm{n_f}^{\mathrm{h}}$$

unde n_f este numărul de ordine al fusului orar respectiv.

Pe lângă aceste categorii fundamentale de timp, în multe ţări se utilizează şi "*ora oficială*" ("de vară" sau "de iarnă"), care poate avea un avans de o oră faţă de timpul legal respectiv. Datorită faptului că trecerea de la ora oficială de vară la timpul legal şi de la timpul legal la timpul universal sau invers se face prin adunarea sau scăderea unui număr întreg de ore, este mai simplu să notăm direct diferitele momente în "timp universal".

c. Transformări de timp

Vom încerca, în continuare, să găsim legătura dintre timpul sideral local al unui observator oarecare şi timpul universal; această legătură ne va permite să calculăm timpul sideral local al observatorului la un anumit moment de timp universal.

Prin urmare, vom putea trece de la una din categoriile de timp, la oricare alta din cele cinci enumerate la paragraful precedent.

Să considerăm situaţia planelor meridiane la 0^h TU, adică la miezul nopţii "Greenwich" (fig. 2.23); C este centrul Pământului, Cγ reprezintă planul meridian al punctului vernal γ, CG_0 planul meridian Greenwich la miezul nopţii, iar CO planul meridian al observatorului O, aflat la longitudinea λ ; t_0 este timpul sideral la miezul nopţii Greenwich.

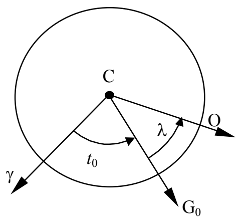


Figura 2. 23

Fie acum momentul de timp universal UT; evident, UT este exprimat în unităţi de timp solar mijlociu. Pentru a afla măsura unghiului cu care s-a rotit Pământul în intervalul UT, este necesar să transformăm acest interval (UT) în unităţi de timp sideral; vom nota cu $\mathrm{UT_s}$ timpul universal exprimat în unităţi de timp sideral.

Deci, la momentul UT, planul meridian Greenwich va fi deplasat spre est cu unghiul UT_s, față de poziția de la miezul nopții; situația planelor meridiane la momentul UT va arăta, deci, ca în figura 2.24.

Aici, UT_s este unghiul cu care s-a rotit Pământul de la 0^h UT până la momentul UT, reprezentând timpul sideral la "miezul nopții Greenwich", λ fiind longitudinea observatorului.

Timpul sideral local t al observatorului O, la momentul UT, este unghiul format de planul meridian al observatorului cu planul meridian al punctului vernal γ; deci, conform figurii 2.24,

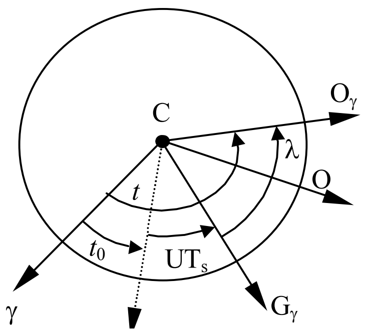


Figura 2. 24

$$t = UT_s + t_0 + \lambda \ . \tag{2.15}$$

Cum $UT_s = \chi UT$, rezultă:

$$t = \chi UT + t_0 + \lambda \ , \tag{2.16}$$

relație care permite trecerea de la timpul universal la timpul sideral local al unui observator oarecare.

Tot din relația fundamentală (2.15) rezultă că $UT_s = t - t_0 - \lambda$; transformând timpul universal din unități siderale în unități de timp mijlociu, avem $UT = \kappa UT_s$, deci:

$$UT = \kappa(t - t_0 -\lambda) \ . \tag{2.17}$$

Ultima relație permite trecerea de la timpul sideral local al unui observator la timpul universal.

Cele două formule de transformare conțin pe t_0, adică *timpul sideral Greenwich la 0^h UT* din ziua respectivă, deci cele două transformări se pot efectua doar dacă este cunoscut acest parametru.

d. Soluțiile duble

În legătură cu transformarea (2.16) şi - în special - cu transformarea inversă (2.17) se impune o precizare importantă.

Deoarece atât UT, cât şi t, sunt unghiuri care pot lua valori numai în intervalul [0^h, 24^h), relaţia (2.4.17) este, de fapt, o *congruenţă modulo*[1] 24^h:

$$t \equiv \chi \mathrm{UT} + t_0 + \lambda \qquad (\mathrm{mod}\ 24^h) .$$

Astfel, în ipoteza simplificatoare $t_0 = 0$, $\lambda = 0$, funcţia $t(\mathrm{UT})$ are graficul din figura 2.25. Este evident că funcţia dată *nu este biunivocă* pe tot domeniul de definiţie, deci o tentativă de inversare va conduce la o *dublă soluţie*, pentru UT $\in$ ($23^h56^m04^s$, 24^h).

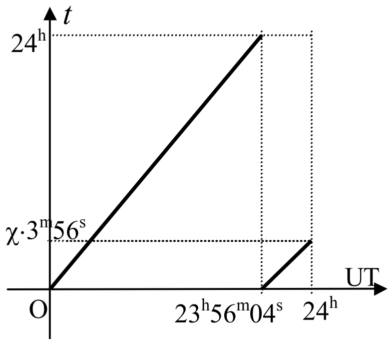


Figura 2. 25

Soluţia dublă (timp universal) se obţine pentru timpul sideral $t \in [\ 0^h\ ,\ \chi \cdot 3^m 56^s\ )$; una din soluţii este:

$$\mathrm{UT} = \kappa\, t\ , \qquad (2.18)$$

iar a doua este:

?? $\mathrm{UT} = \kappa\ (\ t + 24^h)$. (2.19)

?? În cazul general ($t_0 \neq 0$, $\lambda \neq 0$), graficul din figură suferă o translaţie de mărime $t_0 + \lambda$ pe axa Oy, a timpului sideral (fig. 2.26), precum şi o translaţie de mărime t_L-UT pe axa Ox, a timpului "legal".

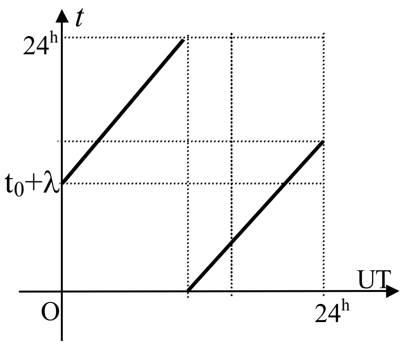


Figura 2. 26

În general, deci, soluţia dublă pentru timpul universal se obţine dacă:

?? $t \in [\ t_0 + \lambda\ ,\ t_0 + \lambda\ + \chi \cdot 3^m 56^s\ )$;

una din soluţii este:

---

[1] O egalitate "abstracţie făcând de un multiplu întreg de 24^h".

?? $UT = \kappa\, t$, (2.18 ')

iar a doua este:

?? $UT = \kappa\, (t + 24^h)$. (2.19 ')

e. Timpul sideral la miezul nopții Greenwich

În vederea efectuării "manuale" a calculelor, "timpul sideral la 0^h UT" poate fi găsit, pentru fiecare zi a anului, în Anuarul astronomic; mai precis, el se găseşte în *efemerida Soarelui*.

Totuşi, pentru calculele efectuate cu calculatorul electronic, este incomod să se introducă t_0 pentru fiecare transformare de timp realizată; mai mult chiar, este posibil ca data calendaristică respectivă să fie generată de program, deci să nu fie cunoscută anterior rulării programelor.

În asemenea situații, este imposibil să se introducă t_0 ca dată de intrare. Pentru a putea calcula automat pe t_0 corespunzător unei date T oarecare, procedăm - în principiu - în felul următor:

- considerăm că se cunoaşte τ_0, timpul sideral Greenwich la 0^h UT al unei date calendaristice T_0;
- $T - T_0$ reprezintă, evident, numărul de zile solare medii care s-au scurs între datele T_0 şi T;
- în acest interval, Pământul efectuează $\chi(T - T_0)$ rotații;
- la ora 0^h UT a datei T, unghiul dintre planul meridian al punctului vernal şi planul meridian Greenwich a ajuns egal cu : $\tau_0 + \chi(T - T_0)$;
- de regulă, acest unghi va cuprinde un număr oarecare de rotații complete şi o fracțiune de rotație; desigur, t_0 este tocmai această fracțiune şi, în consecință:

$$t_0 = \tau_0 + \chi(T - T_0) - [\tau_0 + \chi(T - T_0)] \qquad (2.20)$$

unde cu [ ] s-a notat "partea întreagă" a cantității respective.

2.3.5 Cronologia; ziua iuliană şi ziua iuliană modificată

a. Calendarul iulian şi cel gregorian

Calendarele au fost elaborate de-a lungul timpului, ținându-se cont de periodicitatea fenomenelor astronomice, în speță de durata revoluției Pământului în jurul Soarelui şi a Lunii în jurul Pământului. Regulile adoptate pentru construirea calendarelor diferă de la o civilizație la alta.

Dificultățile care apar în calea elaborării unui calendar provin din faptul că durata unui an "tropic" sau real (365,2422...) nu este un multiplu al zilei solare mijlocii şi nu este nici multiplu al "lunii" sinodice (perioada de repetare a succesiunii fazelor Lunii).

Calendarul lunar, utilizat în vechime în special de babilonieni şi chinezi, introducea perioada de o lună formată din 29,5 zile (intervalul de timp dintre două treceri succesive ale Lunii prin aceeaşi fază). Anul era considerat de 12 luni, totalizând 354 de zile.

După **calendarul luni-solar** a urmat **calendarul solar**, care are la bază mişcarea aparentă anuală a Soarelui. Acest calendar a fost folosit de către egipteni. Anul solar egiptean avea 365 de zile, împărțite în 12 luni a câte 30 de zile, iar la sfârşitul fiecărui an se adăugau 5 zile. Anul egiptean era mai scurt decât anul real cu aproximativ un sfert de zi. Timp de 4 ani sferturile de zi acumulate formau o zi întreagă, astfel că începutul anului solar egiptean se deplasa la fiecare 4 ani cu câte o zi.

În Imperiul Roman situația calendarului ajunsese la un moment dat destul de dificilă, preoții calculând timpul şi sărbătorile după bunul lor plac. Din aceste motive, Iulius Cezar hotărăşte, împreună cu astronomul Sosigene, introducerea unui nou calendar. Acest calendar structurează anul în 365,25 zile, sfertul de zi introducându-se la fiecare 4 ani prin adăugarea unei noi zile.

Anul în care se introduce această zi (după 28 februarie) se numeşte **an bisextil** (sau "bisect"). Este uşor de calculat dacă un an este bisextil sau nu, verificând dacă numărul anului respectiv se divide prin 4.

Dar nici în calendarul iulian (sau pe "stil vechi", cum mai este numit) anul nu corespundea lungimii adevărate a anului tropic. Deoarece anul iulian avea 365,25 de zile, apărea o diferență de 0,0078 zile, care, acumulată timp de 400 de ani, dădea o diferență de aproximativ 3 zile . La sfârşitul secolului al XVI-lea, diferența acumulată atingea 10 zile, iar echinocțiul de primavară cădea la 1 martie în loc de 21 martie. În timpul papei Grigore al XIII-lea, se efectuează o nouă reformă a calendarului, de unde şi denumirea de calendar *gregorian*; ziua de 1 octombrie 1582 devine 15 octombrie 1582.

În calendarul gregorian, pentru a se evita acumularea unor erori, s-a hotărât ca, o dată la 400 de ani, să se scadă 3 zile. Astfel, şi în acest calendar un an este considerat bisextil dacă se divide prin 4 dar, dacă este vorba de un an "secular" (un număr întreg de secole), se mai impune condiția ca şi numărul secolelor să se dividă prin 4. Astfel, anii 1700, 1800, 1900 nu sunt ani bisecți, pe când anul 2000 este.

Această reformă nu a pătruns în toate țările deodată. În țările din răsăritul Europei reforma s-a făcut abia în secolul al XX-lea. În România noul calendar a fost adoptat la 4 octombrie 1924, dată care, prin reformă, a devenit 14 octombrie 1924.

b. Ziua iuliană şi ziua iuliană modificată

Dat fiind că duratele lunilor calendaristice nu sunt egale, dar nici duratele anilor calendaristici nu sunt egale, calculul exact al duratei scurse între două momente consemnate calendaristic este o problemă dificilă. Pentru a se surmonta această dificultate frecvent întâlnită în astronomie, s-a recurs la un sistem uniform de consemnare a evenimentelor - o *cronologie* - bazat pe "*numărarea*" efectivă a zilelor solare medii scurse de la o origine arbitrară până la evenimentul consemnat. "Data" astfel rezultată se mai numeşte "dată iuliană" (sau "perioadă iuliană" sau, cel mai simplu, "*ziua iuliană*" (JD)).

Originea perioadei iuliene este "amiaza" zilei de 1 ianuarie 4713 î.C.; ziua care separă amiaza lui 1 ianuarie de amiaza lui 2 ianuarie are numarul 0. Astfel, ziua care începe la ora 12 la data de 23 iulie 1980 are numărul 2444444,0 şi reprezintă data iuliană (numărul de zile trecute de la momentul 0 al perioadei iuliene). Numele de dată iuliană (JD, ***J**ulian* ***D**ate*) provine de la numele lui Julius Scaliger, tatăl lui Joseph Justus Scaliger, cel care a folosit-o pentru prima oară în scopuri cronologice.

Alegerea originii la amiaza zilei se datoreşte faptului că data iuliană a fost introdusă pentru uzul astronomilor, iar cele mai multe observații astronomice se efectuează noaptea, astfel încât schimbarea datei în cursul unor serii continue de observații era de multe ori incomodă.

În anuarele astronomice sunt publicate tabele indicând câte zile iuliene s-au scurs până la amiaza medie de la Greenwich a fiecărei zile; de aceea, pentru miezul nopții de la Greenwich al aceleiaşi date calendaristice, adică pentru 0^h UT, ziua iuliană trebuie micşorată cu 0,5 zile.

Deoarece primele două cifre se modifică abia peste trei secole, s-a convenit introducerea datei iuliene modificate (MJD, *Modified Julian Date*):

$$MJD = JD - 2400000{,}5$$

Originea acestei noi scări este 17 noiembrie 1858, 0^h. La fel ca data civilă, data iuliană modificată se schimbă la miezul nopții şi nu în mijlocul zilei, ca data iuliană, fiind adoptată de U.A.I. pentru scopuri astronomice în 1973.

DATA IULIANĂ A PRIMEI ZILE DIN AN

anul	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	241									
1900...	5021	5386	5751	6116	6481	6847	7212	7577	7942	8308
1910...	8673	9038	9403	9769	0134*	0499*	0864*	1230*	1595*	1960*
	242									
1920...	2325	2691	3056	3421	3786	4152	4517	4882	5247	5613
1930...	5978	6343	6708	7074	7439	7804	8169	8535	8900	9265
1940...	9630	9996	0361*	0726*	1091*	1457*	1822*	2187*	2552*	2918*
	243									
1950...	3283	3648	4013	4379	4744	5109	5474	5840	6205	6570
1960...	6935	7301	7666	8031	8396	8762	9127	9492	9857	0223*
	244									
1970...	0588	0953	1318	1684	2049	2414	2779	3145	3510	3875
1980...	4240	4606	4971	5336	5701	6067	6432	6797	7162	7528
1990...	7893	8258	8623	8989	9354	9719	0084*	0450*	0815*	1180*
	245									
2000...	1545	1911	2276	2641	3006	3372	3737	4102	4467	4833
2010...	5198	5563	5928	6294	6659	7024	7389	7755	8120	8485
2020...	8850	9216	9581	9946	0311*	0677*	1042*	1407*	1775*	2138*
	246									
2030...	2503	2868	3233	3599	3964	4329	4694	5060	5425	5790
2040...	6155	6521	6886	7251	7616	7982	8347	8712	9077	9443

* Modifică cifra sutelor de mii. Exemplu: anul 1914, JD= 2420134.

Capitolul 2.4

SISTEME DE REFERINȚĂ ASTRONOMICE

2.4.1 Clasificarea sistemelor de referință astronomice

În astronomie se utilizează o gamă largă de sisteme de referință; ele se pot clasifica după cele două elemente definitorii, *originea sistemului și planul său fundamental*, direcția de referință fiind - de regulă - un element cu precădere convențional.

Utilizarea unui sistem este dictată de fenomenul pe care dorim să-l descriem, în termeni cât mai simpli şi cu un aparat matematic cât mai clar; după modelarea fenomenului într-un astfel de sistem, putem să "trecem" oricând, dacă este necesar, la un alt sistem de referință.

De exemplu, mişcarea unei planete[1] poate fi descrisă cel mai simplu într-un sistem de referință cu *originea în Soare*, având ca plan fundamental chiar *planul orbitei planetei*. Acest sistem de referință se numeşte "*sistem heliocentric orbital*".

Orbitele planetelor *nu sunt situate în acelaşi plan*, ci în plane diferite. Pentru localizarea corpurilor din sistemul solar se utilizează, *ca sistem de referință general*, un sistem heliocentric care are ca plan fundamental *planul orbitei Pământului* (numit plan "*ecliptic*")[2]. Acest sistem de referință se numeşte "*sistem heliocentric ecliptic*".

Deoarece observarea corpurilor din sistemul solar se face de pe Pământ, este necesar ca pozițiile lor să fie date şi într-un sistem de referință cu originea în *centrul Pământului*. Un astfel de sistem se numeşte sistem de referință "*geocentric*".

Mişcarea de rotație a Pământului are loc în jurul unei axe care, conform legii conservării momentului cinetic (de rotație), are - în primă aproximație - o *orientare fixă* în spațiu. Planul ecuatorului terestru, care este perpendicular pe axa de rotație are şi el orientarea fixă în spațiu, formând cu planul ecliptic un unghi $\varepsilon = 23°27'$. Dreapta

---

[1] Aceste mişcări vor fi studiate în partea a III-a a cărții de față.

[2] Atributul "*ecliptic*" provine de la faptul că, Soarele şi Pământul aflându-se (prin definiție) întotdeauna în acest plan, alinierea Soarelui, Pământului şi a Lunii - deci producerea *eclipselor* - nu poate avea loc decât atunci când Luna - în mişcarea ei - traversează şi ea planul orbitei Pământului.

de intersecție a planului ecliptic cu planul ecuatorului terestru are deci, şi ea, orientarea fixă în spațiu. Când Soarele - datorită mişcării Pământului - "traversează" planul ecuatorului, el se află pe această dreaptă; evenimentul respectiv se petrece de două ori pe an, în momentele "echinocțiilor".

Dreapta de intersecție a celor două plane, orientată dinspre Pământ spre poziția Soarelui la echinocțiul de primăvară - începutul verii astronomice - se numeşte direcție "*vernală*" (fig. 2.27), "*punctul vernal*" fiind punctul de pe sfera cerească unde este proiectat Soarele în momentul echinocțiului de primăvară.

Alegerea planului ecuatorului terestru ca plan fundamental pentru sistemul geocentric de referință simplifică problemele legate de efectuarea observațiilor asupra corpurilor cereşti. În acest sens, datele pregătitoare şi rezultatele observațiilor se referă la sistemul de referință geocentric ecuatorial.

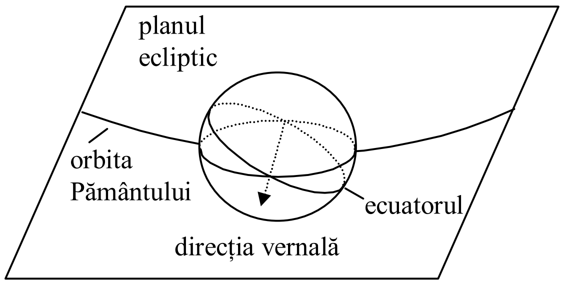


Figura 2. 27

Ca *direcție de referință* pentru sistemele ecliptice şi ecuatoriale s-a ales intersecția planelor fundamentale ale acestora, adică *direcția vernală.* Această alegere simplifică trecerea de la sistemul de referință ecliptic la cel ecuatorial, reducând-o la o rotație de unghi -ε în jurul axei comune O*x* (direcția vernală).

În concluzie, pentru studiul teoretic şi observațional al mişcărilor din sistemul solar se utilizează, în primul rând, următoarele sisteme de referință:

- sisteme de referință heliocentrice orbitale;
- sistemul de referință heliocentric ecliptic;
- sistemul de referință geocentric ecuatorial.

În domenii mai speciale se utilizează şi sisteme de referință heliocentrice ecuatoriale sau geocentrice ecliptice; pentru studiul mişcărilor din Galaxie se utilizează un sistem de referință specific, având ca plan fundamental planul de simetrie al acestui sistem stelar.

Pe de altă parte, în fiecare loc de observare, se impune utilizarea unor sisteme de referință "*topo*centrice", care au originea în *locul* respectiv, dar pot avea ca plan fundamental fie planul orizontal al locului, fie plane paralele cu oricare din planele importante întâlnite până acum (planul ecuatorial, planul ecliptic etc.).

2.4.2 Sisteme de referință topocentrice

a. Sistemul de referință geocentric ecuatorial

Întrucât Pământul este foarte mic față de distanțele cosmice, observatorul terestru poate fi considerat, în multe cazuri, ca aflându-se în centrul Pământului; sfera lui cerească se va numi, în acest caz, *sferă cerească geocentrică.* Prin centrul acestei sfere trec două plane importante: planul orbitei Pământului (*planul ecliptic*) şi planul ecuatorului terestru.

Evident, axa lumii - pentru observatorul geocentric - *coincide* cu axa de rotație a Pământului.

Orice plan paralel cu planul ecuatorului intersectează sfera cerească după un cerc mic, numit *paralel ceresc*. Dacă observatorul geocentric participă la mişcarea de rotație a Pământului, el va constata că sfera cerească se roteşte în jurul axei lumii, în sens contrar mişcării de rotație a Pământului. Această rotație aparentă a sferei cereşti se numeşte rotație sau *mişcare diurnă*; datorită ei, orice astru se află în permanentă mişcare *de-a lungul paralelului* său ceresc.

Ca urmare a mişcării diurne a sferei cereşti, pentru toate problemele legate de observarea aştrilor este utilă introducerea unui sistem de referință având ca plan fundamental planul ecuatorului. Ca direcție de referință a acestui sistem se ia direcția O γ (spre punctul vernal). Acest sistem de referință se numeşte *ecuatorial* (şi *geocentric*, în situația dată).

Coordonatele unghiulare sferice, în sistemul ecuatorial (fig. 2.28), sunt numite:

- unghiul de elevație - *declinație* (δ);
- unghiul de orientare - *ascensie dreaptă* (α).

Declinaţia (δ) se consideră pozitivă spre N şi negativă spre S; ea se exprimă în grade sexagesimale. Ascensia dreaptă (α) se măsoară în sens pozitiv şi se exprimă în ore, minute şi secunde.

Considerând că toţi aştrii se află *pe* sfera cerească, rezultă că ei au razele vectoare egale cu raza sferei cereşti; raza sferei cereşti fiind arbitrară, în problemele legate de observarea aştrilor ea poate fi considerată egală cu 1. Prin urmare poziţia unui astru pe sfera cerească este perfect determinată de cele două coordonate sferice unghiulare α şi δ.

Observatorul (fictiv) geocentric "stă" pe planul ecuatorial; dacă distanţele până la corpurile cosmice sunt suficient de mari încât dimensiunile Pământului să poată fi neglijate, "deplasarea" observatorului într-un punct de pe suprafaţa Pământului nu va modifica "aspectul" sferei cereşti, deci coordonatele ecuatoriale α şi δ vor rămâne - practic - neschimbate. Dar această deplasare va impune observatorului să "stea" pe planul orizontal al locului respectiv, deci primul plan fundamental care va trebui luat în considerare va fi planul orizontal.

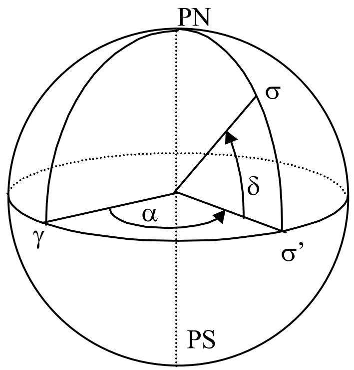


Figura 2. 28

b. Elemente topocentrice de poziţionare a aştrilor

Numim *sferă cerească topocentrică* sfera cerească a unui observator situat într-un punct oarecare pe suprafaţa Pământului şi nu considerat ca aflându-se în centrul acestuia.

Planul tangent la suprafaţa Pământului, în locul de observare, este *planul orizontal* al acelui loc. Vizibilitatea unui astru este condiţionată în primul rând de poziţia sa faţă de planul orizontal al locului; datorită opacităţii Pământului, observatorul poate vedea doar aştrii aflaţi în semispaţiul care nu include Pământul.

Ştim că *înălţimea* ("unghiulară", *h*) a unui astru este unghiul format de direcţia spre astru cu planul orizontal al locului de observare (fig. 2.13). Evident, condiţia de vizibilitate a unui astru este: $h > 0$.

Cercurile mici ale sferei cereşti, aflate în plane paralele cu planul orizontal, reprezintă - fiecare - locul geometric al punctelor de egală înălţime; un astfel de cerc se numeşte "*almucantarat*".

Teorema fundamentală a astronomiei topocentrice, demonstrată în capitolul 2.2, arată că: *înălţimea polului nord ceresc deasupra orizontului este egală cu latitudinea locului de observare*.

Mişcarea de rotaţie a Pământului are loc în sens trigonometric pozitiv; dacă un observator participă la mişcarea de rotaţie a Pământului, va observa că sfera cerească se roteşte - în jurul axei lumii - în sens contrar rotaţiei Pământului, deci în sensul acelor de ceasornic (trigonometric negativ).

Pe sfera cerească aştrii se localizează cu ajutorul ascensiei şi al declinaţiei.

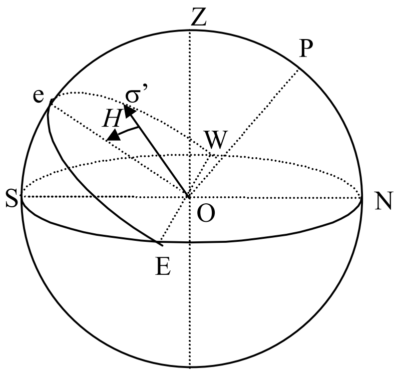


Figura 2. 30

Dar, sfera cerească rotindu-se continuu în jurul axei sale, coordonatele α şi δ nu indică poziţia astrului *faţă de elementele de referinţă topocentrice fundamentale*, orizontul şi meridianul locului.

Faţă de aceste elemente, poziţia fiecărui astru se schimbă încet, dar în permanenţă; această schimbare este urmarea directă a faptului că planul orizontal îşi schimbă în permanenţă poziţia faţă de direcţia vernală, care este fixă în spaţiu şi noi observăm că "punctul vernal γ participă la rotaţia diurnă a sferei cereşti".

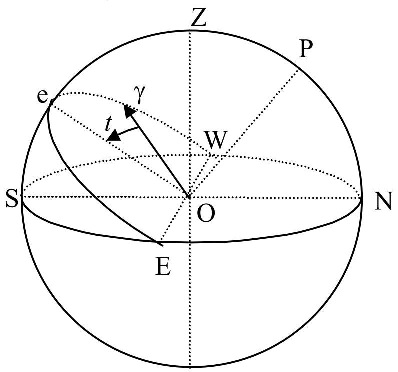


Figura 2. 29

Ştim că se numeşte *timp sideral local* (t, în fig. 2.29) unghiul dintre direcţia spre punctul vernal şi planul meridian al locului.

Față de elementele de referință topocentrice fundamentale, poziția aştrilor se poate fixa cu ajutorul unor unghiuri care vor fi definite mai jos; aceste unghiuri se modifică permanent în timp, pentru fiecare astru.

Se numeşte *unghi orar* (*H*, în fig. 2.30) al unui astru, unghiul dintre planul meridian al locului şi planul meridian al astrului. H se exprimă în ore (^{h}), minute (^{m}) şi secunde (^{s}) şi se consideră pozitiv *în sensul mişcării diurne* a sferei cereşti, adică în sens trigonometric negativ. În particular, *timpul sideral este unghiul orar al punctului vernal*. Evident, pentru orice astru avem

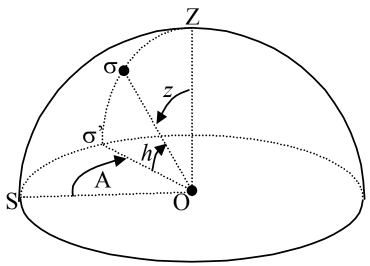


Figura 2. 31

$$H = t - \alpha\ . \tag{2.21}$$

Se numeşte *azimut astronomic* (*A*, în fig. 2.31) al unui astru unghiul dintre direcția spre Sud şi proiecția vectorului de poziție pe planul orizontal. *A* se consideră pozitiv în acelaşi sens cu *H*, deci tot în sens trigonometric negativ, dar se exprimă în (°), (') şi (").

c. Sisteme de referință topocentrice

Pentru a putea utiliza formulele rotațiilor în scopul găsirii legăturilor dintre α, δ, *H*, *A* şi *h*, va trebui să definim, pe baza elementelor topocentrice fundamentale, câteva sisteme de referință cu orientare dreaptă, în care unghiurile amintite să aibă rolul coordonatelor unghiulare.

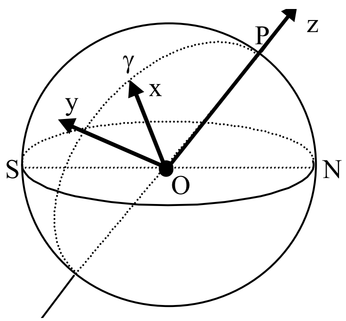


Figura 2. 32

În cazul în care sensul de măsurare al unui unghi (de exemplu: *A*, *H*) nu este cel trigonometric pozitiv, vom lua drept coordonată unghiulară a sistemului de referință opusul unghiului respectiv. În felul acesta, se definesc următoarele sisteme de referință topocentrice:

a) Sistemul de referință *ecuatorial*:
- plan fundamental: al ecuatorului ceresc
- direcția de referință (axa Ox): Oγ.

În acest sistem de referință (fig. 2.32) coordonatele unghiulare sunt:
- ascensia dreaptă (α), unghi de orientare
- declinația (δ), unghi de elevație

b) Sistemul de referință *orar*:
- plan fundamental: al ecuatorului ceresc;
- direcția de referință (axa Ox): intersecția dintre planul meridian al locului şi planul ecuatorului ceresc.

Pentru ca sistemul orar să aibă orientarea dreaptă, se ia ca axă Oy direcția spre est (OE), iar ca axă Oz, axa lumii. În acest sistem (fig. 2.33), coordonatele unghiulare sunt:
- unghiul orar cu semnul schimbat (τ = -*H*), ca unghi de orientare;
- tot declinația (δ), ca unghi de elevație.

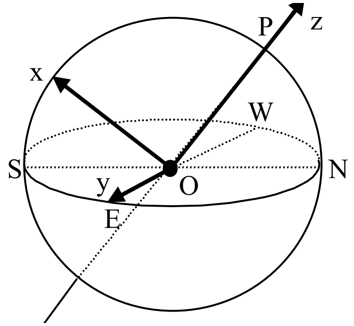


Figura 2. 33

c) Sistemul de referință orizontal:
- plan fundamental: planul orizontal;
- direcția de referință (axa Ox): direcția spre sud (OS).

Pentru ca sistemul orizontal de referință să aibă orientarea dreaptă, se ia ca axă Oy direcția spre est (OE), iar ca axă Oz verticala locului (fig. 2.34). În acest sistem, coordonatele unghiulare sunt:

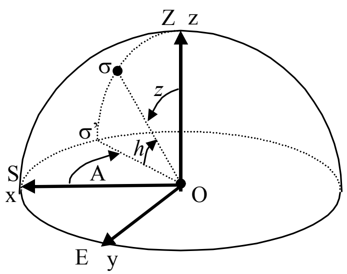


Figura 2. 34

- azimutul cu semnul schimbat ($\theta = -A$), ca unghi de orientare;
- înălţimea h a astrului, ca unghi de elevaţie.

Având în vedere cele de mai sus şi considerând că raza sferei cereşti este $r = 1$, putem să calculăm coordonatele carteziene ale unui astru de pe sfera cerească cu ajutorul formulelor generale (2) din cap. 2.1.

Deoarece $\sin(-u) = -\sin u$ iar $\cos(-u) = \cos u$, coordonatele carteziene ale unui, astru vor fi:

a) în sistemul ecuatorial:

$$\begin{aligned} x_E &= \cos\delta \ \cos\alpha \\ y_E &= \cos\delta \ \sin\alpha \\ z_E &= \sin\delta \end{aligned} \tag{2.22}$$

b) în sistemul orar:

$$\begin{aligned} x_H &= \cos\delta \ \cos(-H) = \cos\delta \ \cos H \\ y_H &= \cos\delta \ \sin(-H) = -\cos\delta \ \sin H \\ z_H &= \sin\delta = \sin\delta \end{aligned} \tag{2.23}$$

c) în sistemul orizontal:

$$\begin{aligned} x_O &= \cos h \ \cos(-A) = \cos h \ \cos A \\ y_O &= \cos h \ \sin(-A) = -\cos h \ \sin A \\ z_O &= \sin h = \sin h \end{aligned} \tag{2.24}$$

Din modul de definire al sistemelor de referinţă topocentrice se remarcă imediat că :
- sistemul orar are axa Oz comună cu sistemul ecuatorial (axa comună este chiar axa lumii);
- sistemul orizontal are axa Oy (direcţia spre est) comună cu sistemul de referinţă orar.

În consecinţă, trecerea de la sistemul ecuatorial la cel orar este o rotaţie axială de unghi t (timpul sideral) în jurul axei Oz; trecerea de la sistemul orar la cel orizontal este o rotaţie axială în jurul axei Oy, de unghi $90°-\varphi$.

d. Relații de transformare între coordonatele topocentrice

Trecerea de la sistemul ecuatorial la cel orar este o rotație de unghi t în jurul axei lumii. Coordonatele unghiulare se transformă conform cu formulele generale:

$$\theta_N = \theta_V - \omega \quad ; \qquad \varepsilon_N = \varepsilon_V \ .$$

În cazul nostru, $\theta_N = -H$, $\theta_V = \alpha$, $\omega = t$; unghiul de elevație este, în ambele sisteme, declinația δ. Regăsim, deci, relația (2.21):

$$-H = \alpha - t \qquad \Rightarrow \qquad H = t - \alpha$$

Trecerea de la sistemul orar la cel orizontal este o rotație axială de unghi $90° - \varphi$ în jurul axei OE (Oy). Formulele generale ale unor astfel de rotații sunt (v. cap. 2.1):

$$\begin{aligned} x_N &= -z_V \cdot \sin\omega + x_V \cdot \cos\omega \\ y_N &= \ \ y_V \\ z_N &= \ \ z_V \cdot \cos\omega + x_V \cdot \sin\omega \end{aligned}$$

În cazul nostru, x_V, y_V, z_V sunt coordonatele carteziene orare, iar x_N , y_N , z_N sunt coordonatele carteziene ale astrului; luând raza sferei cerești r = 1, coordonatele respective sunt date de relațiile (22 şi 23). Obținem, deci:

$$\begin{aligned} x_O &= -z_H \sin(90° - \varphi) + x_H \cos(90° - \varphi) \\ y_O &= \ \ y_H \\ z_O &= \ \ z_H \sin(90° - \varphi) + x_H \sin(90° - \varphi) \end{aligned}$$

Având în vedere că $\sin(90° - \varphi) = \cos\varphi$ şi $\cos(90° - \varphi) = \sin\varphi$, obținem:

$$\begin{aligned} x_O &= -z_H \cos\varphi + x_H \sin\varphi \\ y_O &= \ \ y_H \\ z_O &= \ \ z_H \sin\varphi + x_H \cos\varphi \end{aligned}$$

Înlocuind în formulele rotației coordonatele carteziene cu expresiile lor în funcție de coordonatele unghiulare, obținem relațiile de transformare:

$$\begin{aligned} \cos A \cos h &= -\sin\delta\ \cos\varphi\ + \cos H \cos\delta\ \sin\varphi \\ \sin A \cos h &= \sin H \cos\delta \\ \sin h &= \sin\delta\ \sin\varphi\ + \cos H \cos\delta\ \cos\varphi \end{aligned} \qquad (2.25)$$

Ținând seamă că $H = t - \alpha$, obținem de aici chiar formulele de trecere de la coordonatele ecuatoriale la cele orizontale:

$$\begin{aligned} \cos A \cos h &= -\sin\delta\ \cos\varphi\ + \cos(t-\alpha\ )\cos\delta\ \sin\varphi \\ \sin A \cos h &= \sin(t-\alpha\ )\cos\delta \\ \sin h &= \sin\delta\ \sin\varphi\ + \cos(t-\alpha\ )\cos\delta\ \cos\varphi \end{aligned} \qquad (2.26)$$

În ultima din formulele (2.26), δ şi φ sunt constante şi cuprinse între -90° şi +90°; cosinusurile lor sunt pozitive. În membrul al doilea al egalității, factorul variabil (cos H, sau cos (t - α)) este înmulțit cu factorii pozitivi cos δ şi cos φ.

Prin urmare, sin h va atinge valoarea maximă atunci când cos H este maxim. Dar valoarea maximă a lui cos H este + 1, atinsă pentru H = 0. Analog, valoarea minimă a lui sin h este atinsă simultan cu valoarea minimă a lui cos H. Acest lucru se întâmplă pentru H = 180°, unde cos H = -1.

Pozițiile în care astrul atinge înălțimile extreme deasupra orizontului se numesc culminații; culminația la care înălțimea (h) este maximă se numeşte *culminație superioară* iar cealaltă se numeşte *culminație inferioară*. Conform celor de mai sus rezultă că ambele culminații au loc la trecerea la meridian a astrului respectiv.

Revenim la transformările de coordonate. Trecerea inversă, de la sistemul orizontal la cel orar, este o rotație axială de unghi [-(90° -φ)] în jurul axei OE (Oy). Formulele generale ale rotației în jurul axei Oy, aplicate în acest caz, dau:

$$\begin{aligned} x_H &= -z_O \sin\left[-(90°-\varphi)\right] + x_O \cos\left[-(90°-\varphi)\right] \\ y_H &= \ \ y_O \qquad ; \\ z_H &= \ \ z_O \cos\left[-(90°-\varphi)\right] + x_O \sin\left[-(90°-\varphi)\right] \end{aligned}$$

dar

$$\begin{aligned} \sin\left[-(90°-\varphi)\right] &= -\sin(90°-\varphi) = -\cos\varphi \\ \cos\left[-(90°-\varphi)\right] &= \cos(90°-\varphi) = \sin\varphi \end{aligned} ,$$

deci

$$\begin{aligned} x_H &= z_O \cos\varphi + x_O \sin\varphi \\ y_H &= y_O \\ z_H &= z_O \sin\varphi - x_O \cos\varphi \end{aligned}$$

Formulele de trecere rezultă ca şi în cazul precedent:

$$\begin{aligned} \cos(t-\alpha)\cos\delta &= \sin h\cos\varphi + \cos A\cos h\sin\varphi \\ \sin(t-\alpha)\cos\delta &= \sin A\cos h \\ \sin\delta &= \sin h\sin\varphi - \cos A\cos h\cos\varphi \end{aligned} \tag{2.27}$$

e. Algoritmi de calcul

Din grupul de formule (2.26) se vede că azimutul şi înălţimea unui astru sunt determinate de ascensie şi declinaţie (α şi δ), dar şi de latitudinea locului (φ), precum şi de timpul sideral local (t). Pentru a afla, deci, azimutul şi înălţimea unui astru la un moment T,

- calculăm timpul sideral t, corespunzător lui T;
- calculăm pe sin h cu ultima formulă (2.26);
- h fiind cuprins între -90° şi +90°, sinusul *determină unghiul în mod unic*, deci h poate fi aflat imediat;
- deoarece cos h > 0, avem: $\cos h = +\sqrt{1-\sin^2 h}$;
- împărţind primele două formule (26) la cos h, putem calcula pe sin A şi cos A:

$$\begin{aligned} \sin A &= \sin(t-\alpha)\cos\delta \,/\, \cos h \\ \cos A &= [\cos(t-\alpha)\cos\delta\,\sin\varphi - \sin\delta\,\cos\varphi\,] / \cos h \end{aligned} \tag{2.28}$$

- având la dispoziţie cele două valori de mai sus, aflăm azimutul A, cuprins între 0° şi 360°.

Formulele (2.27), de trecere de la coordonatele orizontale la cele ecuatoriale, se utilizează în mod analog; aici datele necesare sunt A, h, φ şi T :

- calculăm timpul sideral t, corespunzător lui T;
- calculăm pe δ (cuprins între -90° şi +90°), aflându-i sinusul din ultima relaţie (2.27);
- deoarece cos $\delta > 0$, avem: $\cos\delta = +\sqrt{1-\sin^2\delta}$;
- aflăm funcţiile sin şi cos ale unghiului orar H $(t - \alpha)$;

$$\begin{aligned} \sin(t-\alpha) &= \sin A \cos h / \cos\delta \\ \cos(t-\alpha) &= \left[\sin h \cos\varphi + \cos A \cos h \sin\varphi\right] / \cos\delta \end{aligned} \tag{2.29}$$

- se află $(t - \alpha)$, apoi, deoarece t este cunoscut, se află ascensia α.

O ultimă remarcă se impune cu privire la înălţimile pe care le poate avea un astru faţă de orizontul unui loc; ultima din relaţiile (2.26) conţine, în afara unor constante (funcţii trigonometrice ale unghiurilor δ şi φ), un element dependent de timp, unghiul orar H $(t - \alpha)$; se vede imediat că înălţimile extreme se obţin pentru $H = 0$ şi $H = 12^h$, deci pentru cele două treceri la meridian ale astrului respectiv.

2.4.3 Mişcarea diurnă: culminaţiile; aştri circumpolari

a. Înălţimea la culminaţie

Prin *trecerea la meridian* a unui astru se înţelege trecerea acestuia *la meridianul locului*; în decursul unei zile siderale, orice stea trece *de două ori* la meridian.

Deoarece înălţimea maximă şi înălţimea minimă sunt atinse de astru tocmai în momentele trecerilor la meridian, aceste treceri se mai numesc *culminaţii*; ele sunt de două feluri: culminaţii *superioare* şi culminaţii *inferioare*. După cum arată şi numele, culminaţia superioară este aceea la care se atinge înălţimea maximă (h_M), iar culminaţia inferioară este culminaţia la care astrul atinge cea mai mică înălţime (h_m).

Pentru a găsi legătura care există între h_M , h_m , declinaţia δ a astrului şi latitudinea φ a observatorului, considerăm secţiunea din sfera cerească topocentrică, dată de planul meridian al locului.

În figura 2.35,
- axa lumii este PP' ,
- orizontul locului este SN,
- verticala locului este ZZ' ,
- ecuatorul ceresc este ee' , iar
- astrul aflat la culminaţia superioară este σ.

Ştim că $\angle NOP = \varphi$, deci $\angle SOe = 180° - 90° - \varphi = 90° - \varphi$. Având în vedere că $\angle eo\sigma = \delta$, rezultă că:

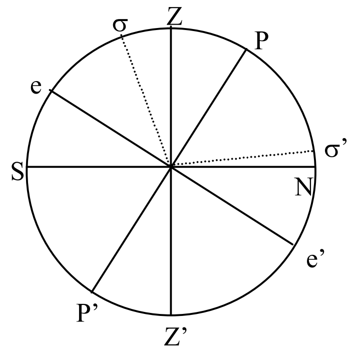


Figura 2. 35

$h_M = \angle SO\sigma = \angle SOe + \angle eO\sigma$, adică:

$$h_M = 90° - \varphi + \delta (2.30)$$

Considerăm acum astrul σ la culminaţia inferioară, fie aceasta σ' (fig. 2.35); avem:

$$h_m = \angle NO\sigma' = \varphi - 90° + \delta \qquad (2.31)$$

Observăm, în concluzie, că înălţimea maximă şi înălţimea minimă a unui astru deasupra orizontului unui loc depind *numai* de declinaţia astrului respectiv şi de latitudinea locului de observare.

b. Circumpolaritate şi inaccesibilitate

Condiţia ca o stea să nu apună niciodată într-un anumit loc, deci să fie permanent vizibilă pentru observatorul respectiv, este $h_m > 0$; dar $h_m = \varphi - 90° + \delta$ şi, în consecinţă, condiţia devine:

$$\varphi - 90° + \delta > 0 \Rightarrow \qquad \delta > 90° - \varphi . \qquad (2.32)$$

Stelele care se află permanent deasupra orizontului unui observator se numesc stele *circumpolare*. Relaţia de mai sus arată că o stea este circumpolară pentru un observator *dacă declinaţia ei este mai mare decât complementul latitudinii observatorului*. De exemplu, în ţara noastră (latitudine mijlocie 45°) sunt circumpolare stelele cu declinaţia mai mare de $+45°$.

Condiţia ca o stea să fie *permanent invizibilă* pentru un observator este ca:

$h_M < 0$; dar $h_M = 90° - \varphi + \delta$, deci condiția inițială devine:

$$90° - \varphi + \delta < 0 \quad \Rightarrow \quad \delta < \varphi - 90° . \qquad (2.33)$$

Astfel, la latitudinea țării noastre sunt *inaccesibile observației* toate stelele cu declinația mai mică de -45°.

c. Aspectul cerului la diferite latitudini

Aspectul cerului - adică desfăşurarea fenomenelor diurne cereşti - pentru un observator terestru este determinat de poziția axei lumii a acelui observator; cum înălțimea polului nord ceresc este egală cu latitudinea φ, rezultă că aspectul sferei cereşti topocentrice *este determinat de latitudinea locului*.

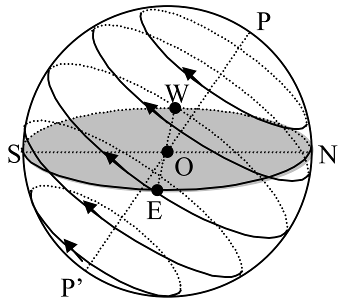


Figura 2. 36

La o latitudine mijlocie, un observator are permanent deasupra orizontului stelele circumpolare, nu poate vedea niciodată anumite stele, iar o mare parte din aştrii vizibili *răsar, culminează şi apun* (fig. 2.36).

Să considerăm două cazuri extreme: observatorul *situat la un pol geografic* şi observatorul *situat la ecuator*. Pentru observatorul situat la Polul Nord, deci cu $h_p = \varphi = 90°$, rezultă că:

- axa lumii coincide cu verticala locului;
- Polul Nord ceresc coincide cu zenitul locului;
- ecuatorul ceresc coincide cu orizontul locului;
- înălțimea unei stele este permanent egală cu declinația acesteia , deci este constantă;
- *stelele nu răsar şi nici nu apun*.

Acest lucru se poate vedea şi aplicând, pentru acest caz, condițiile (2.32), respectiv (2.33):

- La Polul Nord ($\varphi = 90°$), sunt *circumpolare* stelele cu $\delta > 0°$;
- Sunt *permanent inaccesibile* stelele cu $\delta < \varphi - 90°$, adică cu $\delta < 0°$.

Planele traiectoriilor diurne ale stelelor, paralele cu planul ecuatorial ceresc, sunt paralele cu planul orizontal (fig. 2.37).

Dacă observatorul este la ecuator (fig. 2.38), $\varphi = 0°$ şi rezultă că $h_p = 0°$, adică polii cereşti se află pe orizont, axa lumii fiind *conţinută în planul orizontal*.

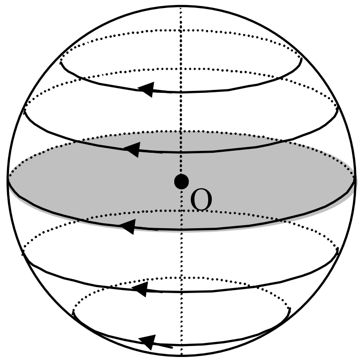


Figura 2. 37

Planul ecuatorului ceresc este, deci, *perpendicular pe planul orizontal* şi ecuatorul ceresc trece prin zenit. Planele tuturor paralelelor cereşti sunt, şi ele, perpendiculare pe planul orizontal. Toate stelele de pe sfera cerească răsar şi apun: condiţia de permanentă vizibilitate dă $\delta > 90°$, iar condiţia de permanentă invizibilitate dă $\delta < -90°$. Ori, nu există stele cu astfel de declinaţii ! Cu alte cuvinte, la ecuator nu există stele circumpolare, dar nici stele permanent invizibile.

d. Crepusculul

Lumina Soarelui nu ajunge "direct" la suprafaţa Pământului; ea traversează atmosfera acestuia şi suferă o puternică *difuzie*; datorită acestui fenomen, cerul zilei este în întregime luminos şi nu pot fi observate stelele şi planetele care se află deasupra orizontului.

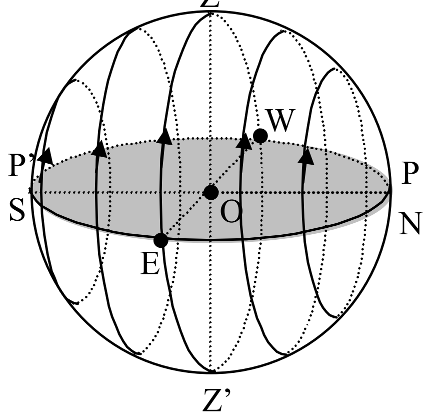


Figura 2. 38

Dacă Pământul nu ar avea atmosferă, pe cerul de zi s-ar vedea Soarele, dar şi ceilalți aştrii aflați deasupra orizontului; aceasta este situația pe care au putut s-o constate astronauții care au vizitat Luna.

Difuzia luminii solare în atmosfera terestră mai are şi o altă consecință, de multe ori de spectaculoasă: trecerea de la noapte la zi - respectiv, de la zi la noapte - nu se face brusc, odată cu răsăritul - respectiv răsăritul - Soarelui. Această trecere se face gradat, deoarece atmosfera de deasupra unui loc de observare este luminoasă chiar când Soarele se află la câteva grade sub orizontul locului. Bineînțeles, lumina atmosferei este cu atât mai puternică cu cât Soarele este mai aproape de orizont.

Fenomenul de iluminare a cerului când Soarele se află sub orizont se numeşte *crepuscul*; crepusculul de seară se mai numeşte *asființit*, iar cel de dimineață se mai numeşte *auroră*.

În asființit, aştrii încep să apară (nu să *răsară*) treptat, în ordinea crescătoare a magnitudinilor lor; în afară de Lună, planeta Venus (*Luceafărul*) este primul astru vizibil, dacă este deasupra orizontului (întotdeauna spre Vest!). Se mai spune că este Luceafăr "*de seară*". În aurora dimineții, tot Venus este cea care se "topeşte" ultima, în fondul cerului; în acest caz, al vizibilității ei matinale, Venus se mai numeşte Luceafăr "*de dimineață*".

Crepusculul "astronomic" are loc atâta timp cât Soarele are o înălțime mai mare de -18°; noaptea, în afara crepusculului astronomic, se pot vedea cele mai slabe stele cunoscute. Mai există două categorii de crepuscul: cel "nautic", care ține câtă vreme $h > -12°$, şi crepusculul "civil", care durează câtă vreme Soarele are înălțimea $h > -6°$.

Cum înălțimea h a Soarelui depinde de declinația δ a acestuia, iar declinația Soarelui variază sensibil în timpul anului [1], rezultă că durata crepusculului suferă variații anuale importante.

La anumite latitudini, se poate întâmpla ca înălțimea minimă a Soarelui (la culminația inferioară, deci la miezul nopții) să fie mai mare de cele 18°, sau chiar 6° ale crepusculului civil; acesta este fenomenul "nopților albe", asupra căruia vom mai reveni.

Să mai menționăm aici doar un fapt care ține tot de "aspectul cerului la diferite latitudini": în zona ecuatorială, Soarele - ca toți aştrii, de altfel - apune şi răsare "cel mai repede" (este suficient să comparăm

---

[1] aproximativ de la -23° la +23° în decurs de un an; a se vedea capitolul 2.5 şi partea a III-a a cărții de față.

figura 2.38 cu figura 2.36). Astfel se explică de ce, în relatările călătorilor din zonele tropicale apare frecvent menţiunea că "seara se lasă dintr-odată", sau că "Soarele răsare fulgerător".

O ultimă remarcă: la poli nu mai sunt definite (nu mai există) punctele cardinale (v. fig. 3.37)!

2.4.4 Predicţia fenomenelor cereşti diurne

a. Cazul stelelor

Tabelele de poziţii folosite în astronomie (*efemeridele*) conţin doar coordonatele ecuatoriale ale corpurilor cosmice, singurele care nu depind de timpul sideral; pe baza acestora, orice observator poate să calculeze poziţia orizontală a unui astru, pentru orice moment dorit.

Ne propunem acum să determinăm momentele unor "*fenomene cereşti diurne*", adică ale unor evenimente remarcabile din cursul mişcării diurne a unui astru; este vorba de momentele (şi poziţiile) topocentrice orizontale ale *răsăritului, apusului şi culminaţiilor* unui astru. Vom începe cu cazul stelelor, care sunt "fixe" pe sfera cerească, modificarea poziţiilor ecuatoriale ale lor fiind neglijabilă. Presupunem că sunt cunoscute: ascensia dreaptă (α), declinaţia (δ), latitudinea locului de observare (φ), timpul sideral (t) şi trebuie să se afle azimutul (A) şi momentul răsăritului astrului respectiv; aceeaşi problemă o vom avea pentru apus şi pentru culminaţii.

Deoarece în cazul răsăritului şi apusului $h = 0$, avem $\cos h = 1$ şi $\sin h = 0$; deci, formulele (2.26) devin:

$$\begin{aligned} \cos A &= \cos(t-\alpha)\cos\delta\ \sin\varphi - \sin\delta\ \cos\varphi \\ \sin A &= \sin(t-\alpha)\cos\delta \\ 0 &= \cos(t-\alpha)\cos\delta\ \cos\varphi + \sin\delta\ \sin\varphi \end{aligned} \quad . \tag{2.34}$$

De aici se poate afla timpul sideral (t), deci momentul la care are loc răsăritul sau apusul; ultima relaţie (2.34) dă:

$$\cos(t-\alpha) = -\operatorname{tg}\delta\ \operatorname{tg}\varphi \tag{2.35}$$

Deoarece un unghi nu este complet determinat de cosinusul său, iar din formulele (3.4.1??) nu se poate afla sinusul, există două soluţii: una în care $t - \alpha > 0$, şi alta în care $t - \alpha < 0$. Deoarece aştrii răsar *dinspre est* şi apun *spre vest*, t - α (= H) < 0 va fi soluția corespunzătoare răsăritului, iar $t - \alpha > 0$ va fi soluția corespunzătoare apusului.

Atunci, pentru răsărit avem:

$$\cos(t_1 - \alpha) = -\operatorname{tg}\delta \quad \operatorname{tg}\varphi$$

$$\sin(t_1 - \alpha) = -\sqrt{1 - \cos^2(t_1 - \alpha)}$$

Cunoscând sinusul şi cosinusul unui unghi, putem afla unghiul $t_1 - \alpha \in [\,0°, 360°\,)$; cunoscând pe $(t_1 - \alpha)$ şi α, se poate afla t_1, momentul răsăritului (evident, în timp sideral local).

Pentru apus avem:

$$\cos(t_2 - \alpha) = -\operatorname{tg}\delta \quad \operatorname{tg}\varphi$$

$$\sin(t_2 - \alpha) = +\sqrt{1 - \cos^2(t_2 - \alpha)}$$

de unde se poate afla unghiul $(t_2 - \alpha)$, iar apoi t_2, adică momentul apusului.

Pentru a afla *locul* răsăritului sau apusului, este necesară şi aflarea azimutului A, corespunzător momentelor de răsărit şi de apus. Acesta se poate afla cu ajutorul celorlalte formule (2.34); pe rând, pentru momentele t_1 şi t_2, se calculează $\sin A_1$ şi $\cos A_1$ (respectiv $\sin A_2$ şi $\cos A_2$), de unde rezultă azimutele respective, în intervalul $[\,0°, 360°\,)$.

Momentul culminației superioare se determină din condiția:

$$H = t_M - \alpha = 0 \quad \Rightarrow \quad t_M = \alpha \tag{2.36}$$

Analog, momentul culminației inferioare se deduce din condiția:

$$H = t_m - \alpha = 12^h \quad \Rightarrow \quad t_m = \alpha + 12^h \tag{2.37}$$

Observarea trecerii la meridian a unui astru permite aflarea ascensiei sale, dacă se poate înregistra timpul sideral al acestui moment; invers, dacă este cunoscută ascensia astrului, se poate afla timpul sideral corespunzător trecerii la meridian.

b. Fenomene diurne duble

În legătură cu fenomenele cereşti diurne, trebuie să menționăm un fapt care poate părea - la prima vedere - surprinzător; este vorba despre faptul că, în anumite zile, o stea poate răsări, apune sau poate culmina (superior, respectiv inferior) *de două ori*!

Acest paradox este doar aparent. Într-adevăr, după cum s-a arătat în cap. 2, ziua siderală - durata rotației Pământului - este cu aproximativ 4^m *mai scurtă* decât ziua "civilă"; în consecință, o stea care răsare la 2 - 3^m după miezul nopții civile "are timp" să mai răsară încă o dată, în aceeaşi zi civilă!

Din punct de vedere al "surprinderii" acestor soluții duble pentru fenomenele cereşti diurne, problema este rezolvată prin discuția de la 2.3.4, privind neunivocitatea posibilă a transformării timpului sideral în timp universal (solar mijlociu, sau civil). Într-adevăr, dacă - prin algoritmii de mai sus - se determină timpul sideral al unui fenomen oarecare, trecerea la timpul solar mijlociu dă automat cele două soluții, dacă este cazul, deci dacă sunt îndeplinite condițiile menționate la 2.3.4.

c. Fenomenele diurne în cazul aştrilor mobili pe sfera cerească

Toate calculele efectuate mai sus au fost efectuate în ipoteza că astrul este "fix" pe sfera cerească, având tot timpul aceleaşi coordonate ecuatoriale α şi δ. Această ipoteză este valabilă pentru cazul stelelor, dar nu şi pentru obiectele din sistemul solar; datorită "apropierii" lor de Pământ, mişcarea lor - ca şi mişcarea Pământului - determină o continuă modificare a coordonatelor ecuatoriale ale lor, pentru un observator terestru.

Algoritmul de calcul al pozițiilor ecuatoriale ale unui obiect din sistemul solar - care va fi prezentat în partea a III-a - permite determinarea pozițiilor ecuatoriale corespunzător oricărui moment dat; problema - în cazul când dorim pozițiile *pentru a calcula un fenomen ceresc diurn* (răsăritul, apusul sau trecerea la meridian) - este că noi nu cunoaştem *dinainte* momentele respective.

Aparent, este vorba de un cerc vicios: pentru a afla momentul fenomenului, ne trebuie poziția ecuatorială din acel moment, iar pentru a calcula poziția ecuatorială, avem nevoie de momentul respectiv!

Ieşirea din acest cerc vicios este posibilă datorită faptului că mişcările aparente ale corpurilor din sistemul solar - modificările pozițiilor ecuatoriale - sunt *mici* (chiar dacă nu neglijabile) în raport cu mişcarea diurnă a sferei cereşti, mişcare ce determină fenomenele cereşti diurne.

Datorită acestui fapt, problema se poate rezolva *prin aproximații succesive*, efectuând calculele *iterativ*:

1. se ia poziția ecuatorială a astrului pentru un moment inițial - de regulă, 0^h UT, ziua respectivă - şi se calculează momentul fenomenului în ipoteza că această poziție nu se modifică;
2. se calculează poziția ecuatorială pentru momentul determinat al fenomenului;
3. cu noua poziție ecuatorială, se calculează momentul fenomenului în ipoteza că această poziție nu se modifică;
4. dacă variația momentului este superioară erorii acceptate, se trece la pasul 2; dacă nu, procesul se încheie aici.

Partea a III-a

DE LA CER LA UNIVERS

Motto:

Legea fizică trebuie să aibă frumusețe matematică.
Dirac

CUPRINS:

Cap. 3.3 PROGNOZA MIŞCĂRII CORPURILOR DIN SISTEMUL SOLAR

3.3.1 Parametrii mişcării eliptice
3.4.5 Efemerida unei obiect din sistemul solar

3.4.1 Istoric
3.4.2 Verificare experimentală
3.4.3 Problema celor două corpuri
3.4.4 Pertubații, problema celor n corpuri
3.4.5 Cazul sistemelor stelare

Cap. 3.4. FENOMENE CARE MODIFICĂ POZIȚIILE APARENTE ALE AŞTRILOR

Capitolul 3.1

PARALAXE ŞI DISTANȚE

Astronomia începe cu studierea fenomenelor observate pe sfera cerească; descoperind realitatea din "spatele" acestor fenomene aparente, ea le explică şi ajunge să prezică producerea fenomenelor ce vor putea fi văzute în viitorul mai mult sau mai puțin apropiat (răsăritul şi apusul aştrilor, deplasarea planetelor, cometelor, a Lunii printre stele, eclipsele, ocultațiile etc.).

Acestă trecere de la aparență la realitate (şi invers) conține, ca verigă esențială, determinarea paralaxelor astronomice ale aştrilor, paralaxe care permit aflarea distanțelor cosmice şi constituirea unei imagini tridimensionale a lumii din jurul Pământului.

3.1.1 Paralaxe

a. Deplasarea paralactică sau paralaxa

Toată astronomia (topocentrică), pe care am descoperit-o până acum, are observatorul (sau "locul de observare") în centru.

Dar cum vor fi percepute fenomenele sau mărimile astronomice dacă observatorul se deplasează din acel loc? Nu ne referim aici la deplasări importante la scara geografiei, deoarece am studiat în altă parte aspectul cerului la diferite latitudini; ne interesează efectul deplasărilor mai mici ale observatorului, cel puțin în raport cu distanța observator-obiect observat.

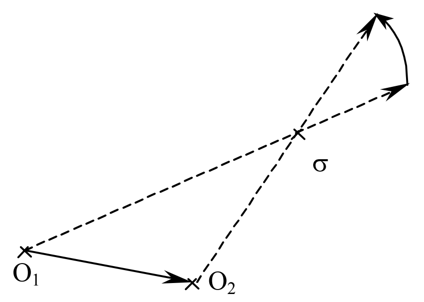


Figura 3.1

Evident, deplasarea reală în spațiu a observatorului produce o schimbare a direcției observator - astru, adică o schimbare aparentă a direcției în care observatorul "vede" astrul; această modificare aparentă a direcţiei spre astru se numeşte *deplasare paralactică* (fig. 3.1).

Pentru a studia deplasarea paralactică a unui astru σ la deplasarea reală a observatorului din punctul O_1 în O_2 , vom alege sistemul de referinţă sistemul următor (fig. 3.2):

- ca plan fundmental se ia planul $O_1O_2\sigma$;
- ca direcţie de referinţă se ia O_1O_2;
- ca origine iniţială se ia O_1;

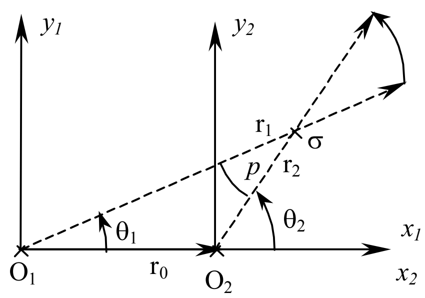


Figura 3.2

considerând că observatorul constituie mereu originea, vom trece la un nou sistem de referinţă cu aceleaşi elemente, dar cu originea în O_2.

Evident, trecerea de la primul sistem la al doilea se face printr-o translaţie de-a lungul axei comune Ox.

Dat fiind că la această translaţie unghiul de elevaţie al astrului σ rămâne tot timpul nul, modificarea direcţiei observator - astru este caracterizată complet de modificarea unghiului de orientare θ.

Notăm coordonatele carteziene ale astrului σ cu x_1, y_1, şi x_2, y_2, iar coordonatele polare cu r_1, θ_1 şi r_2, θ_2, în sistemul de referinţă $x_1O_1y_1$ şi respectiv $x_2O_2y_2$.

Întrucât în orice sistem de axe rectangulare relaţiile dintre coordonatele carteziene şi cele polare sunt:

$$\sin\theta = \frac{z}{r} \quad ; \quad \cos\theta = \frac{x}{r} \quad ,$$

putem scrie că:

$$\begin{cases} \sin\theta_1 = \dfrac{y_1}{r_1} \\ \cos\theta_1 = \dfrac{x_1}{r_1} \end{cases} \qquad \begin{cases} \sin\theta_2 = \dfrac{y_2}{r_2} \\ \cos\theta_2 = \dfrac{x_2}{r_2} \end{cases} \tag{3.1}$$

Notând $O_1O_2 = r_0$, observăm că:

$x_1 - r_0 = x_2$; $y_1 = y_2$ (formulele translației).

Ținând seama de cele obținute mai sus, setul de relații (3.1) devine:

$$\begin{cases} \sin\theta_1 = \dfrac{y}{r_1} \\ \cos\theta_1 = \dfrac{x_1}{r_1} \end{cases} \qquad \begin{cases} \sin\theta_2 = \dfrac{y}{r_2} \\ \cos\theta_2 = \dfrac{x_1 - r_0}{r_2} \end{cases} \tag{3.2}$$

unde $y_1 = y_2 = y$

Să calculăm sinusul diferenței dintre θ_2 şi θ_1:

$$\sin(\theta_2 - \theta_1) = \sin\theta_2 \cos\theta_1 - \cos\theta_2 \sin\theta_1$$

Având în vedere relațiile (3.2), cu ajutorul cărora facem substituțiile necesare, relația precedentă se scrie:

$$\sin(\theta_2 - \theta_1) = \frac{y}{r_2} \cdot \frac{x_1}{r_1} - \frac{x_1 - r_0}{r_2} \cdot \frac{y}{r_1} =$$

$$= \frac{1}{r_1 \cdot r_2} \cdot [x_1 y - (x_1 - r_0) y] = \frac{1}{r_1 \cdot r_2} \cdot r_0 y =$$

$$= \frac{r_0}{r_2} \cdot \frac{y}{r_1} = \frac{r_0}{r_2} \cdot \sin\theta_1$$

Notând cu *p* unghiul sub care se vede baza r_0 din astrul σ, observăm (fig. 4.2) că, θ_2 fiind unghi exterior al triunghiului $O_1O_2\sigma$,

$$\theta_2 = \theta_1 + p\ , \quad \text{adică} \quad p = \theta_2 - \theta_1\ . \tag{3.3}$$

Prin urmare, avem:

$$\sin p = \frac{r_0}{r_2} \cdot \sin\theta_1 \quad . \tag{3.4}$$

Evident, *p* este o mărime inaccesibilă direct observatorului; relația (3.3) arată însă că ea poate fi măsurată *indirect*, datorită egalității cu deplasarea paralactică. Existența deplasării paralactice este condiționată, evident, de deplasarea reală r_0 a observatorului; r_0 se mai numeşte ***bază*** a deplasării paralactice.

În urma celor obținute mai sus, putem de următoarea definiție generală:

Se numeşte *paralaxă* a unui astru, în raport cu o bază r_0, *unghiul sub care se vede baza dată, din acel astru*.

Paralaxa unui astru este chiar *deplasarea paralactică* a astrului, creată de deplasarea observatorului de la un capăt la celălalt al bazei, sau, încă, *diferența unghiurilor de orientare* ale astrului, *determinate la capetele bazei*.

Evident, operațiile efective de măsurare pot fi efectuate de un observator care se deplasează de la un capăt la altul al bazei, sau de doi observatori aflați în cele două puncte.

Dacă astrul observat este relativ apropiat de observator, cum este cazul meteorilor, al sateliților artificiali sau chiar al Lunii, operația trebuie să se efectueze de către *doi* observatori, în mod simultan, la capetele bazei alese. Altfel, mişcarea rapidă a astrului face ca în loc de un triunghi paralactic, să avem un patrulater!

b. Paralaxa oculară şi efectul stereoscopic

Ştim că, dacă închidem alternativ ochiul drept, apoi cel stâng, lăsându-l pe celălalt deschis, vom observa o schimbare consecutivă a direcției în care se vede un anumit obiect mai apropiat (v. par.1.2.6, pag.55). Deplasarea imaginii este cu atât mai mică cu cât obiectul respectiv este situat mai departe.

Explicația constă în cele prezentate la paragraful anterior, şi anume: deoarece ochii noştri sunt situați în două puncte diferite, din acestea obiectul considerat se vede sub două unghiuri de orientare diferite. Privirea alternativă a obiectelor cu cei doi ochi provoacă o *deplasare paralactică* a obiectelor; evident, fiecărui obiect privit îi corespunde o anumită *paralaxă oculară*.

În cazul acesta baza este distanța dintre axele optice ale ochilor (aproximativ 6 cm); prin experiența descrisă, nu facem decât să arătăm că obiectele apropiate de noi au paralaxe oculare apreciabile. Ca în orice caz de deplasare paralactică, paralaxele oculare ale obiectelor scad cu distanța, devenind neglijabile pentru obiectele foarte îndepărtate de noi.

Privind obiectele din apropierea noastră cu cei doi ochi, suntem capabili să sesizăm (fără să ştim!) diferențele de paralaxă oculară ale diferitelor obiecte; pe această bază putem aprecia prompt şi cu siguranță care obiecte sunt mai apropiate şi care sunt mai depărtate de noi. Ne aducem aminte că această proprietate a vederii umane se numeşte "stereoscopie" sau "vedere în relief" (*vederea binoculară* este *stereoscopică*!).

Stereoscopia dispare dacă privim doar cu un singur ochi; de asemenea, stereoscopia dispare în cazul în care obiectele se află la distanțe mult mai mari decât baza noastră oculară.

Uneori, pentru obiectele foarte îndepărtate de noi, putem crea "*modele stereoscopice*" ale acestora, privind cu fiecare din cei doi ochi câte o imagine luată de la capetele unei baze mult mai mari, de exemplu din două poziții succesive ale unui avion care survolează zona respectivă.

De aceea, fotografia aeriană "continuă" este metoda principală de realizare a modelelor stereoscopice ale terenului, modele pe baza cărora, prin metodele *fotogrammetriei*, se realizează hărțile şi planurile topografice.

Distanța (aproximativă) până la care vederea binoculară este stereoscopică se poate calcula pe baza următorului raționament: pentru ca distanța până la un punct să nu mai poată fi apreciată prin efectul strereoscopic, este necesar ca paralaxa oculară a acelui punct să fie insesizabilă, deci cele două imagini care concură la producerea efectului stereoscopic trebuie să fie inseparabile.

Cu alte cuvinte, *paralaxa oculară a punctului respectiv trebuie să fie mai mică decât puterea de separare a ochiului uman* (aproximativ 1', v. par. 1.2.3, pag. 42).

Probleme:

Problema 3.1.1: Să se evalueze limita vederii stereoscopice.

Problema 3.1.2: Să se evalueze limita vederii stereoscopice ??

c. Determinarea distanțelor

Definim *paralaxa normală* a unui astru, ca fiind paralaxa acelui astru în raport cu o bază perpendiculară pe una din direcțiile de observare.

Dacă $\theta_1 = 90°$, rezultă că $\sin\theta_1 = 1$, deci (3.4) devine:

$$\sin p = \frac{r_0}{r_2} \qquad \Rightarrow \qquad r_2 = \frac{r_0}{\sin p} \tag{3.5}$$

Acest caz particular nu face decât să reliefeze mai clar un fapt care este evident şi în cazul general (3.4):

Determinarea paralaxei unui astru în raport cu o bază cunoscută permite determinarea prin calcul a distanței până la corpul ceresc considerat.

Această metodă este una din cele mai simple metode de determinare a distanțelor cosmice; caracterul geometric (trigonometric) al metodei face ca ea să fie numită, generic, "*metoda paralaxelor trigonometrice*".

3.1.2 Paralaxe geocentrice

a. Clasificarea paralaxelor astronomice

Paralaxele utilizate în diferite situații depind de baza aleasă. Pentru precizia determinărilor, trebuie ca baza să fie cât mai mare posibilă şi, totodată, constantă.

De aceea, este util să se definească două categorii de paralaxe:

a) *Paralaxe geocentrice* sau *diurne*, care reprezintă unghiul sub care se vede dintr-un obiect cosmic (al sistemului solar) ***raza geocentrică*** a observatorului (distanța dintre centrul Pământului şi locul de observație). Pentru obiectele din afara sistemului solar, paralaxa geocentrică are valori neglijabile, mult sub limita preciziei eventualelor măsurători; chiar pentru planetele exterioare depărtate ea este prea mică pentru a fi utilizabilă.

Paralaxa geocentrică normală a unui astru se *numeşte paralaxa diurnă orizontală*; ea reprezintă paralaxa astrului când acesta se află la orizontul locului de observaţie. Din figura 3.3 reiese că:

$$\sin p = \frac{R}{\Delta}$$

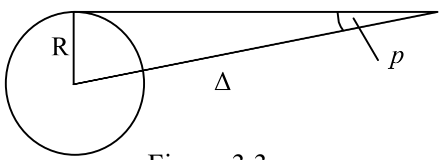


Figura 3.3

unde R = raza Pământului, corespunzătoare locului de observaţie, iar Δ distanţa dintre astru şi centrul T al Pământului.

b) *Paralaxe heliocentrice sau anuale*, care utilizează ca bază raza (semiaxa mare) a orbitei terestre, mărime numită şi *unitate astronomică* (1 u.a.). Aceste paralaxe sunt utile mai ales în cazul stelelor sau al altor obiecte din afara sistemului solar.

b. Paralaxa Lunii

Determinarea paralaxei Lunii este mult facilitată de faptul că satelitul nostru natural este relativ apropiat de Pământ; de aceea, dacă doi observatori se plasează pe un acelaşi meridian geografic, la o distanţă cât mai mare, ei pot determina paralaxa Lunii măsurând distanţa zenitală a acesteia în momentul trecerii ei la meridian.

Într-adevăr, din figura 3.4 se deduce imediat că:

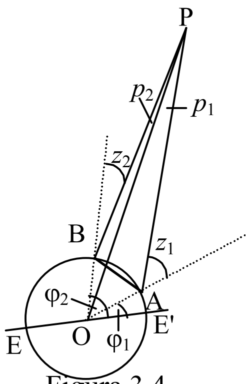


Figura 3.4

$$z_1 + z_2 = (\phi_2 - \phi_1) + (p_1 + p_2)$$

şi, în final,

$$(p_1 + p_2) = (z_1 + z_2) - (\phi_2 - \phi_1) \quad . \qquad (3.6)$$

Deşi atât de simplă, metoda descrisă mai sus nu a fost aplicată efectiv, cu precizia posibilă, decât abia în anul 1751, deoarece deplasările pe mari distanţe durau mult şi erau costisitoare. La epoca amintită, observațiile au fost efectuate de doi astronomi francezi care s-au deplasat la Capetown (La Caille) şi la Berlin (Lalande).

Determinarea precisă a paralaxei Lunii a arătat că aceasta se află la o distanţă de aproximativ 60 de raze terestre de Pământ; se confirma, de fapt, evaluarea făcută de Ptolemeu încă din antichitate (secolul al II-lea e.n.), printr-o metodă mai expusă erorilor, dar care se baza pe observații efectuate dintr-un singur loc de observare.

c. Paralaxele planetelor

Planetele fiind la distanțe mult mai mari decât Luna, determinarea paralaxei lor prin metoda precedentă este afectată de erori prea mari pentru a putea fi aplicată în mod curent.

Totuşi, deoarece planetele se află în permanentă mişcare, ele (cel puțin "vecinele" Pământului) se pot afla în anumite momente la distanțe mai mici, care permit aplicarea metodei directe pentru determinarea paralaxelor. Acest lucru este valabil şi pentru unele planete mici (asteroizi) care, în general, au orbite cuprinse între Marte şi Jupiter.

Astfel, în 1672, Cassini şi Picard, aflați în Franța, şi Richer, aflat la Cayenne (Guiana franceză), au găsit valoarea de 25" pentru paralaxa lui Marte, corespunzătoare configurației din momentul observației.

Planeta Venus se apropie chiar mai mult de Pământ decât Marte, dar acest lucru se întâmplă când Venus se află "între" Soare şi Pământ, fiind practic "înnecată" în lumină şi imposibil de observat cu precizia necesară acestor determinări.

Asteroidul *Eros*, având o orbită mai alungită (excentrică) decât alte planete şi având semiaxa de numai 1.46 u.a., se apropie de Pământ, în cele mai favorabile momente, la doar 0.12 u.a.; evident, este una din planetele mici a căror paralaxă se poate determina în condiții optime.

Dar despre importanța istorică a lui *Eros,* despre paralaxa Soarelui şi despre unitatea astronomică vom mai discuta în capitolul următor.

3.1.4 Paralaxele heliocentrice; parsecul

Având în vedere faptul că paralaxele stelare sunt toate mai mici de o secundă, formulele obişnute pentru calculul distanţei pot fi adaptate pentru unghiuri mici. Prin analogie cu (1.2), se poate deduce că[1]:

$$\sin p'' = \frac{p''}{206265''} \tag{3.7}$$

În cazul paralaxei normale, deoarece $r_0 = 1$ U.A , avem, succesiv,

$$\sin p = \frac{p''}{206265''} = \frac{r_0}{r_2} \quad \Rightarrow \quad r = \frac{206265''}{p''} U.A. \tag{3.8}$$

Distanţa stelei celei mai apropiate, Proxima Centauri, care are paralaxa heliocentrică maximă $p = 0'',76$ este

$$r = \frac{206265''}{p''} = 272000 \ U.A. \tag{3.9}$$

Unitatea astronomică este prea mică pentru a exprima distanţele stelare; de aceea, se defineşte o altă unitate de măsură:

Parsecul (pc) este distanţa corespunzătoare unei *paralaxe heliocentrice normale de o secundă.*

$$1\ pc = 206265 \text{ U.A.} = 3{,}25 \text{ a.l.} \tag{3.10}$$

Deci:

---

[1] De obicei se procedează (aparent) mai riguros, pornindu-se de la cunoscuta relație din analiza matematică:

$$\lim_{x \to 0} \frac{\sin x}{x} = 1 \ ,$$

unde unghiul este exprimat în radiani. De aici reiese că $\sin p \cong p$, dacă p este exprimat în *radiani*. Dar exprimarea radianului în secunde se face, ca la deducerea relației (1.2), tot prin regula de trei, simplă; se obține 1 radian = 206265", ceea ce conduce la același rezultat.

$$r(pc) = \frac{1}{p''} \qquad (3.11)$$

Reținem, deci, că determinarea distanțelor până la stele este echivalentă cu determinarea paralaxelor lor.

3.1.5 Din nou despre magnitudinile stelare absolute

Este momentul să ne reamintim definiția magnitudinii absolute, formulată la paragraful 1.1.5e (pag.42):

> *Magnitudinea absolută* a unui astru este magnitudinea pe care ar avea-o acel astru *dacă el s-ar afla la 10 parseci* (10 pc) distanță de observator.

De asemenea, reamintim "formula magnitudinilor absolute" (1.25'), pe care am dedus-o în acelaşi paragraf:

$$M = 5 + m - 5\lg\Delta \quad ;$$

aici m este magnitudinea aparentă a stelei, iar Δ este distanța până la ea, exprimată în parseci.

Acum, pe baza relației (3.11), putem exprima magnitudinea absolută a unei stele direct prin paralaxa acesteia, exprimată, evident, în secunde de arc; relația de mai sus devine:

$$M = m + 5 + 5\lg\pi\ , \qquad (3.12)$$

care se numeşte, şi ea, "formula magnitudinilor absolute".