

Astronomie

Cursul 12 - Caracteristici ale stelelor deduse din observații

Cristina Blaga

12 ianuarie 2026

Stele

Definiție

O **stea** este un corp ceresc în echilibru hidrostatic care radiază în exterior energie produsă în interior.

Proprietăți generale ale stelelor

Formă de echilibru, mecanisme de producere a energiei

- ▶ Dacă nu se află în rotație rapidă sau în câmp magnetic puternic, stelele au formă de echilibru **sferică**.
- ▶ Energie radiată de stele este produsă, în principal, prin reacții de fuziune nucleară. Ele sunt inițiate dacă temperatura din stea este foarte mare, de aceea sunt numite **reacții termonucleare**.
- ▶ La începutul și sfârșitul vieții stelelor, energia radiată de ele provine din **contractie gravitațională**.

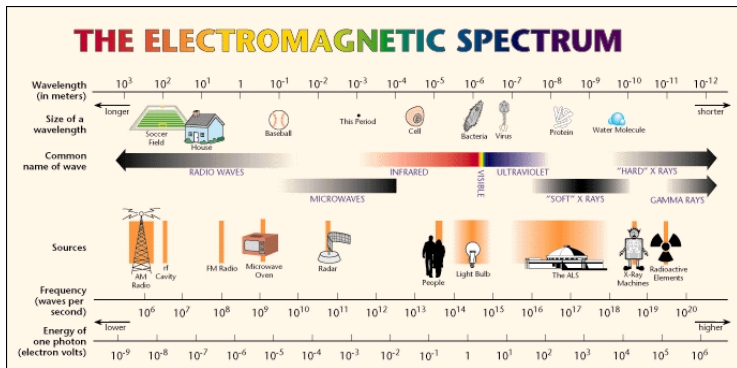
Mărimile caracteristice stelelor se împart în două grupe:

- ▶ **mărimi intrinseci** care depind numai de procesele care au loc în stea și
- ▶ **mărimi extrinseci** care depind de stea dar și de distanța de la stea la observator.

O mărime intrinsecă este masa stelei sau câtă energie emite steaua în unitatea de timp. Dar, cât de strălucitoare este steaua depinde nu numai de energie emisă de stea, dar și de distanța de la stea la noi.

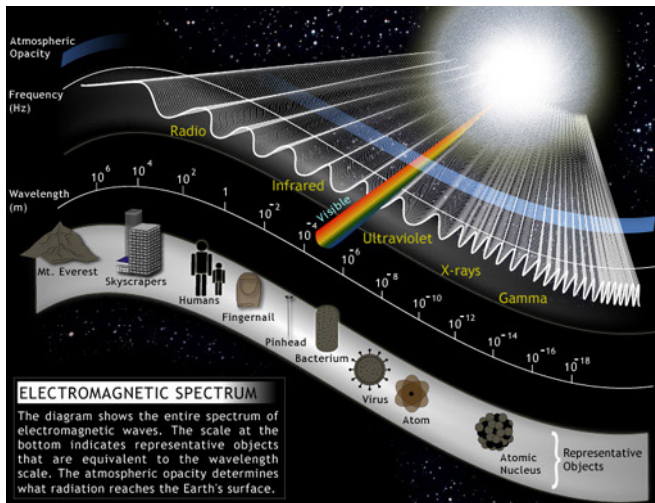
Spectrul electromagnetic

Analizând distribuția de energie din spectrul steii se obțin date despre stea.



Lungimea de undă și frecvența radiației din spectrul electromagnetic.

Fereastra radio și în vizibil



Atmosfera terestră este transparentă la radiația electromagnetică din domeniul vizibil și radio.

Temperatura efectivă a stelei

Temperatura stelei se obține din spectrului stelei.

Definiție

Temperatura efectivă a stelei T_e este definită ca temperatura corpului negru ce ar emite același flux de radiație ca steaua considerată.

Cea mai mare parte a radiației primite de la o stea provine din fotosfera stelei, pătură din atmosfera ei vecină cu interiorul stelei, *i.e.* temperatura efectivă a stelei este temperatura din fotosfera ei, de aceea temperatura efectivă este numită și *temperatura de la suprafața stelei*.

Legea Stefan-Boltzmann

Din legea lui Stefan-Boltzmann, dacă steaua este asimilată cu un corp negru, atunci fluxul de radiație emis de stea în unitatea de timp F este proporțional cu puterea a patra a temperaturii efective a stelei

$$F = \sigma T_e^4$$

unde $\sigma = 5,67 \times 10^8 J/(m^2 s K^4)$ este constanta lui Stefan.

- ▶ Fluxul de radiație a unui corp este energia care traversează unitatea de arie a corpului respectiv.
- ▶ În cazul stelelor asimilate unor sfere de gaz, dacă R este raza stelei, relația între luminozitatea și fluxul ei este

$$F = \frac{L}{4\pi R^2}.$$

Legea lui Wien

Temperatura efectivă a stelelei este legată de lungimea de undă în care se atinge un maxim al radiației primite de la stea prin legea lui Wien, care spune că produsul dintre lungimea de undă în care se atinge maximum radiației și temperatura efectivă a stelei este constant

$$\frac{\lambda_{max}}{0,29cm} = \frac{1K}{T_e}.$$

- ▶ Temperatura efectivă a stelelor variază între 3000 K și 50.000 K, iar λ_{max} între infraroșu și raze X moi.
- ▶ Temperatura efectivă a Soarelui este 5870 K.

Raza stelelor

Metode de determinare

Există *metode directe* de determinare a razelor stelelor:

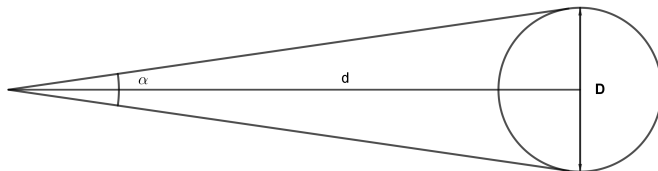
- ▶ trigonometrică,
- ▶ interferometrică sau
- ▶ metode specifice unor clase de stele, cum sunt cele pentru stelele ocultate de Lună sau sistemele binare cu eclipsă și

metode indirecte care presupun determinarea razei stelei din modele stelare.

Metoda trigonometrică se aplică doar la stelele care au disc aparent. Cunoscând unghiul sub care se vede steaua și distanța până la ea se află raza stelei. Dacă notăm cu α unghiul sub care se vede steaua și cu d distanța la ea, atunci

$$\sin \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}(\text{radiani}) = \frac{R}{d}$$

Aproximarea unghiurilor mici



$$\alpha(\text{secunde de arc}) \approx 206265 \frac{D}{d}$$

Figura: Unghiul sub care se vede un obiect ceresc, diametrul unghiular α , exprimat în secunde de arc, este calculat aproximativ folosind formula $\alpha \approx 206265 \frac{D}{d}$, unde D este diametrul liniar și d distanța până la el.

Metoda interferometrică presupune separarea razelor de lumină ce provin din diferite părți ale stelei și suprapunerea lor. În felul acesta se poate măsura raza stelelor care subîntind unghiuri mai mari de 0,01 secunde de arc. Limitele metodei sunt impuse de turbulența atmosferei. Ea se poate aplica la stelele gigante și supergigante apropiate de noi. În cazul stelei α Sco diametrul unghiular al stelei, aflat prin metoda interferometrică, este de 0,04 secunde de arc. Cum distanța la stea este ~ 130 pc, prin metoda trigonometrică s-a putut determinat raza stelei $\sim 600 R_{\odot}$.

O altă metodă de determinare a razelor stelelor este observarea ocultațiilor stelelor de către Lună. Metoda se poate aplica stelelor care se află pe traiectoria descrisă aparent de Lună pe bolta cerească și presupune determinarea foarte precisă a momentelor de contact exterior și interior dintre limbul Lunii¹ și stea.

¹Prin *limbul Lunii* înțelegem frontiera Lunii.

La *sistemele de stele binare cu eclipsă* determinarea razelor componentelor stelei se poate face analizând curba de lumină a sistemului binar.

Două stele care interacționează gravitațional formează un *sistem binar*.

Dacă stelele sunt considerate puncte materiale mișcarea lor este dată de soluția problemei celor două corpuri: mișcarea lor este plană, ele descriu elipse în jurul centrului comun de masă.

Dacă una dintre stele are masa mult mai mare decât cealaltă, atunci centrul de masă al sistemului va fi aproape de centrul de masă al stelei masive, numită *stea principală*. A doua stea, numită *secundară*, descrie o elipsă cu focarul aflat aproape de centrul de masă al stelei principale.

Binary Star Orbit

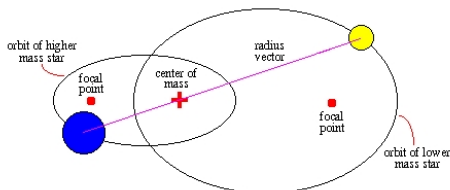


Figura: Mișcarea stelelor dintr-un sistem binar.

Dacă observăm mișcarea stelelor unui sistem binar din planul de mișcare al stelelor atunci periodic una dintre stele trece prin fața sau prin spatele celeilalte, de aceea spunem că sistemul binar este cu eclipsă. Când steaua secundară este în spatele stelei principale se produce o *eclipsă secundară*, iar când secundara trece prin fața stelei principale are loc o *eclipsă principală*.

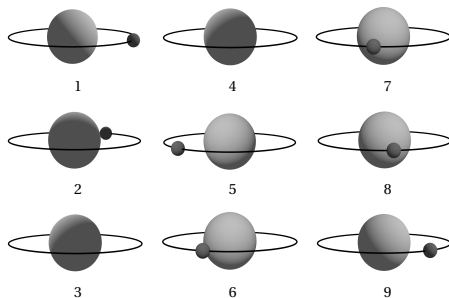


Figura: Sistem binar cu eclipsă

Graficul variației magnitudinii aparente, notată cu Δm , funcție de timp ne dă *curba de lumină a sistemului*. Curba de lumină a sistemului binar cu eclipsă este reprezentată mai jos.

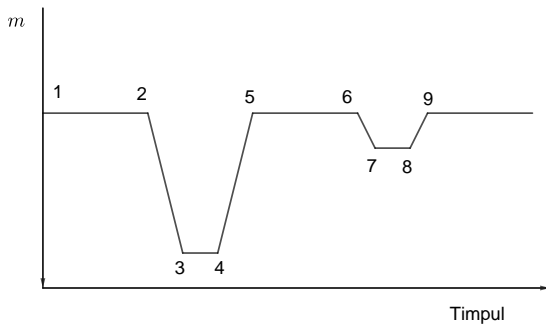


Figura: Curba de lumină a sistemului binar cu eclipsă de mai sus

Dacă sistemul binar se deplasează pe direcția radială față de noi cu viteza V și steaua secundară descrie o orbită circulară cu viteza v în raport cu principala, atunci viteza radială a stelei secundare față de noi variază între $V + v$ și $V - v$. În spectrul secundare liniile spectrale observate sunt deplasate. Conform efectului Doppler dacă $\Delta\lambda_1$ și $\Delta\lambda_2$ sunt deplasările maxime ale liniei spectrale λ_0 atunci

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_0} = \frac{V + v}{c}, \quad \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_0} = \frac{V - v}{c}.$$

Scăzând relațiile de mai sus obținem

$$\frac{\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2}{\lambda_0} = 2 \frac{v}{c}$$

din care putem afla v .

În sistemul binar considerăm că steaua principală are diametrul D , iar steaua secundară diametrul d și că steaua secundară descrie orbita circulară în jurul principalei cu viteza constantă v . La eclipse strălucirea sistemului scade. Din curba de lumină a sistemului binar se pot afla momentele de contact a stelelor. Notăm cu t_1 , respectiv t_4 momentele de contact exterior al stelelor și cu t_2 și t_3 cele de contact interior. Distanța parcursă de steaua secundară între momentele de contact exterior este $D + d$, iar între cele de contact interior $D - d$, de aceea putem scrie

$$D + d = v(t_4 - t_1), \quad D - d = v(t_3 - t_2)$$

sistem de ecuații din care putem afla razele celor două stele.

Modelul prezentat mai sus este mult simplificat față de sistemele binare concrete. În realitate

- ▶ componentele sistemului binar descriu orbite eliptice în jurul centrului de masă comun,
- ▶ forma de echilibru a stelelor nu este sferică,
- ▶ observatorul nu se află în planul de mișcare a stelelor,
- ▶ strălucirea lor nu este uniformă, stelele pot avea pete asemănătoare cu cele observate pe suprafața Soarelui.

Raza stelelor se poate afla și prin *metode indirecte* când sunt cunoscute alte mărimi specifice stelei. De exemplu, dacă luminozitatea stelei și temperatura ei superficială sunt cunoscute, atunci din

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$$

se poate determina raza stelei.

Între razele stelelor există diferențe mari. Razele

- ▶ stelelor neutronice sunt ~ 10 km,
- ▶ piticelor albe $\sim 10^{-2} R_{\odot} \sim 10^3$ km,
- ▶ gigantelor $\sim 20 R_{\odot}$,
- ▶ supergigantelor $\sim 100, 1000 R_{\odot}$ (raza unei stele supergigante este \sim cu semiaxa mare a orbitei lui Saturn).

Raza stelelor secvenței principale variază între $0,5 R_{\odot}$ și $10 R_{\odot}$, domeniul de variație a razei acestor stele este mult mai restrâns decât cel în care variază luminozitatea lor.

Masa stelelor

În cazul stelelor care fac parte dintr-un sistem binar masa poate fi determinată din observații. Dacă presupunem că stelele, de masă M_1 , respectiv M_2 , din care este alcătuit sistemul binar descriu orbite circulare în jurul centrului comun de masă, de raze a_1 , respectiv a_2 , dacă sistemul este izolat, atunci din conservarea impulsului centrului de masă obținem

$$M_1 a_1 = M_2 a_2.$$

Din legea a III a lui Kepler exactă putem scrie

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G(M_1 + M_2)}$$

unde T este perioada orbitală, $a = a_1 + a_2$ este raza mișcării componentei secundare în raport cu cea primară.

În sistemul solar, legea a III-a a lui Kepler se scrie sub forma

$$\frac{T_{\oplus}^2}{a_{\oplus}^3} = \frac{4\pi^2}{G(M_{\odot} + M_{\oplus})}.$$

Dacă neglijăm masa Pământului în raport cu masa Soarelui și împărțim ultimele două relații obținem

$$\frac{M_1 + M_2}{M_{\odot}} = \frac{(a/1 u.a.)^3}{(T/1 \text{ an terestru})^2}.$$

Din conservarea impulsului sistemului de corpuri și legea a treia a lui Kepler putem estima masa componentelor dacă elementele cinematice ale mișcării sistemului sunt cunoscute. Pentru a afla caracteristicile mișcării trebuie avută în vedere înclinarea planului orbital față de direcția de vizare, excentricitatea orbitelor descrise de stele în jurul centrului comun de masă, alte efecte datorate variației intrinseci a stelelor (efecte mareice, depărtarea de la forma sferică ș.a.).

Masa stelelor se exprimă în mase solare. Masa Soarelui, M_{\odot} , este egală cu $1,989 \cdot 10^{30}$ kg. Masa stelelor variază între $0,1 M_{\odot}$ și $100 M_{\odot}$. Stelele secvenței principale au masa cuprinsă între $0,5 M_{\odot}$ și $10 M_{\odot}$.

Densitatea medie a stelei

Prin definiție **densitatea medie** a stelei, $\bar{\rho}$, este raportul dintre masa și volumul stelei

$$\bar{\rho} = \frac{M}{\frac{4\pi R^3}{3}}.$$

Densitatea medie a Soarelui este $1,41 \text{ g/cm}^3$. Densitatea medie minimă o au stelele supergigante (10^{-6} g/cm^3). Piticele albe au densitate medie de 10^6 g/cm^3 . Densitatea medie maximă o au stelele neutronice ($10^{14} - 10^{15} \text{ g/cm}^3$). O linguriță de materie din care este alcătuită o stea neutronică cântărește o tonă.

La stelele variabile pulsatorii, *i.e.* luminozitatea lor se modifică periodic datorită variației razei stelei, între densitatea medie a stelei și perioada pulsației există relația

$$T\sqrt{\bar{\rho}} = \text{constant.}$$

Cum perioada pulsației T se poate găsi din observații, relația de mai sus ne permite să aflăm direct densitatea medie a stelei.

Accelerația gravitațională la suprafața stelei este definită prin

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

unde G este constanta atracției gravitaționale. La suprafața Soarelui $g_{\odot} = 274 \text{ m/s}^2 \sim 28 \text{ g}$, unde g este accelerația gravitațională la suprafața Pământului.

Observăm că $g \sim \Phi = (GM)/R$, unde Φ este potențialul gravitațional la suprafața stelei. Un foton de masă $m_f = (h\nu)/c^2$ poate părăsi suprafața stelei dacă învinge câmpul gravitațional al stelei. Energia pierdută de foton la evadarea din câmpul gravitațional al stelei ($\Delta E = h\Delta\nu = \Phi m_f$) conduce la micșorarea energiei fotonului. Deplasarea relativă a liniei spectrale a unui foton care a evadat de la suprafața unei pitice albe este $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-4}$, valoare aflată la limita capacității de detectare a deplasării liniilor spectrale.

Model de subiect de examen pentru cursul opțional (MIR, MIE)

I. (5 x 0.5 puncte) Alegeți variantele corecte pentru următoarele afirmații:

1. Diferența dintre durata zilei solare și a zilei siderale se datorează
 - (a) precesiei echinocțiilor,
 - (b) perturbației orbitei terestre de către Lună,
 - (c) încetinerii treptate a rotației Pământului sau
 - (d) mișcării orbitale a Pământului în jurul Soarelui.
2. Perioada de mișcarea a Lunii în jurul Pământului este egală cu (a) luna siderală, (b) luna sinodică, (c) anul sideral sau (d) un an tropic.

I. (5 x 0.5 puncte) Alegeți variantele corecte pentru următoarea afirmație

3. O eclipsă totală de Lună se produce când
- (a) Luna trece numai prin conul de penumbră al Pământului,
 - (b) Luna trece prin conul de umbră al Pământului,
 - (c) conul de umbră al Lunii intersectează suprafața Pământului sau
 - (d) conul de penumbră al Lunii intersectează suprafața Pământului.

I. (5 x 0.5 puncte) Alegeți variantele corecte pentru următoarele afirmații

4. Care dintre următorii ani este an bisect (a) 2000, (b) 2010, (c) 2020 sau (d) 2030. De ce?
5. Principala mărime care ne oferă informații despre densitatea medie a unei planete este (a) vârsta, (b) viteza de rotație în jurul propriei axe, (c) compoziția internă sau (d) viteza de revoluție în jurul Soarelui.

II. (5 x 0.5 puncte) Răspundeți pe scurt la următoarele întrebări.

1. Definiți meridianul locului. Ce coordonată se măsoară de la meridianul locului?
2. Descrieți, pe scurt, în ce constă refracția astronomică? Ce consecințe are?
3. Cu ajutorul hărții mobile stabiliți ce stea strălucitoare apune până la miezul nopții în seara de revelion? Justificați-vă răspunsul.
4. Ce înseamnă meteor? Dar meteorit? Ce legătură există între cele două clase de corpuri?
5. Enunțați legea lui Wien și definiți mărimile care apar în ea. Explicați de ce această lege este întâlnită sub numele de legea deplasării a lui Wien.

III. (2 x 1.5 puncte) Rezolvați următoarele probleme:

1. Desenați sfera cerească pentru un observator aflat la latitudinea de 45°N . Reprezentați pe sferă orizontul matematic, ecuatorul ceresc, punctele cardinale (Sud, Nord și Vest), punctul aflat la Zenitul observatorului, Polul ceresc Nord, Polul ceresc Sud și meridianul locului. Precizați la ce înălțime deasupra orizontului se află Polul ceresc nord și reprezentați o stea care are azimutul $A = 110^{\circ}$ când apune. De pe desen estimați unghiul orar și declinația stelei.

III. (2 x 1.5 puncte) Rezolvați următoarele probleme:

2. Desenați sfera cerească pentru un observator din emisfera nordică. Reprezentați pe ea ecuatorul ceresc, axa lumii, ecliptica, punctul vernal, punctul autumnal, axa polilor eclipticii, meridianul ecliptic și poziția Soarelui la începutul toamnei astronomice. Desenați, de asemenea, poziția unui astru de longitudine ecliptică 45° și latitudine ecliptică $+20^\circ$. De pe desen estimați coordonatele ecuatoriale ale astrului.

Notă: Se acordă 2 puncte din oficiu. Timp de lucru 80 de minute. Subiectul I se corectează folosind algoritmul de la admitere.