

## Viața Stelelor

**Alexandre Costa, Beatriz García, Ricardo Moreno, Rosa M. Ros**

Uniunea Astronomică Internațională, Școala Secundară Loulé (Portugalia),  
Universitatea Tehnologică Națională (Mendoza, Argentina), Școala Retamar  
(Madrid, Spania), Universitatea Tehnică din Catalonia (Barcelona, Spania)

### Sumar

Pentru a înțelege viața stelelor este necesar să înțelegem: ce sunt acestea, cum putem afla cât de departe se află ele, cum evoluează și care sunt diferențele dintre acestea. Putem explica elevilor, prin experimente simple, cum lucrează oamenii de știință pentru a studia compoziția stelelor și, de asemenea, cum se pot construi modele simple.

### Obiective

Acest workshop este complementar cursului NASE despre evoluția stelară, prezentând diverse activități și demonstrații centrate pe înțelegerea evoluției stelare. Principalele scopuri sunt următoarele:

- Înțelegerea diferenței dintre magnitudinea aparentă și magnitudinea absolută.
- Înțelegerea diagramei Hertzsprung-Russell cu ajutorul unei diagrame simple culoare-magnitudine.
- Înțelegerea unor concepte cum ar fi: supernovă, stea neutronică, pulsar și gaură neagră.

### Activitatea 1: Conceptul de paralaxă

Paralaxa este un concept care este utilizat în astronomie pentru a calcula distanțele. Vom realiza o activitate simplă care va permite elevilor să înțeleagă ce este paralaxa. Fiecare elev se așează cu fața spre un perete situat la o anumită distanță față de el astfel încât să aibă în jur diverse repere: un dulap, mese, uși etc. Fiecare întinde o mână înainte și ține degetul mare în poziție verticală (figurile 1a și 1b).

Închide mai întâi ochiul drept, vezi exemplul cu degetul în centrul unei imagini. Fără a mișca degetul mare, închide ochiul drept și deschide ochiul stâng. Degetul s-a deplasat, nu mai ocupă poziția corespunzătoare centrului imaginii, ci o altă poziție aproape de marginea acesteia.

Din acest motiv, atunci când observăm cerul din două localități aflate la distanță mare una față de cealaltă, corpurile care sunt mai apropiate, cum ar fi Luna, par aliniat cu stelele din fundal care sunt la distanță mult mai mare. Deplasarea este mai mare dacă distanța dintre cele două locuri din care se realizează observațiile este mai mare. Această distanță se numește linie de bază.



Fig. 1a: Cu brațul întins se privește poziția degetului mare față de obiectul din fundal, mai întâi cu ochiul stâng (închizând ochiul drept) apoi (Fig. 1b) se privește cu ochiul drept (închizând ochiul stâng)

## Calcularea distanței la stele cu ajutorul paralaxei

Paralaxa este modificarea aparentă a poziției unui obiect când este privit din locuri diferite. Poziția unei stele apropiate relativ la stelele din fundal care sunt mult mai îndepărtate pare să se schimbe când este privită din două locuri diferite. Putem determina astfel distanța până la stele mai apropiate.

Paralaxa este apreciabilă dacă distanța care reprezintă linia de bază este maximizată. Această distanță este diametrul orbitei Pământului în jurul Soarelui (figura 2).

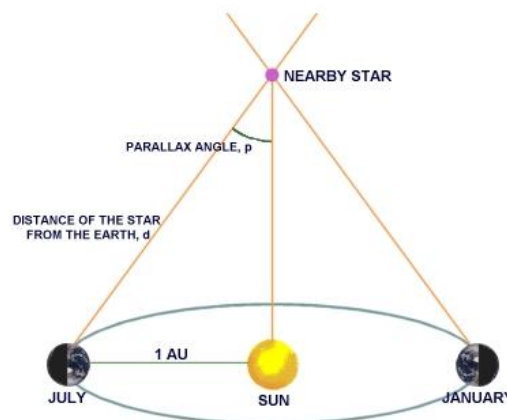


Fig. 2: Unghiul de paralaxă  $p$  este deplasarea unghiulară pe care o vedem când observăm o stea din două locuri care se află la o distanță egală cu distanța Pământ-Soare.

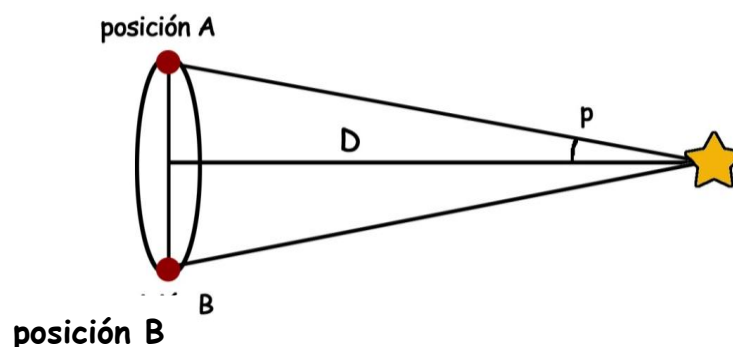


Fig. 3: Prin măsurarea unghiului de paralaxă,  $p$ , este apoi posibil să se calculăm distanța  $D$  până la obiect.

De exemplu, dacă observăm, față de stelele din fundal, o stea apropiată din două poziții A și B situate pe orbita Pământului (figura 3), la un interval de șase luni, putem calcula distanța  $D$  la care se află steaua, obținând:

$$\tan p = \frac{AB/2}{D}$$

Deoarece  $p$  este un unghi foarte mic, tangenta poate fi aproximată cu unghiul măsurat în radiani:

$$D = \frac{AB/2}{p}$$

Baza triunghiului  $AB/2$  este distanța Pământ-Soare, 150 milioane km. Dacă avem unghiul de paralaxă  $p$ , atunci distanța până la stea, în kilometri, va fi  $D = 150.000.000 / p$ , cu unghiul  $p$  exprimat în radiani. De exemplu, dacă unghiul  $p$  este de o secundă de arc, distanța la stea este:

$$D = \frac{150000000}{2\pi/(360 \cdot 60 \cdot 60)} = 30939720937064 \text{ km} = 3,26 \text{ l.y}$$

Baza triunghiului  $AB/2$  este distanța Pământ-Soare, 150 milioane km. Dacă avem unghiul de paralaxă  $p$ , atunci distanța până la stea, în kilometri, va fi  $D = 150.000.000 / p$ , cu unghiul  $p$  exprimat în radiani. De exemplu, dacă unghiul  $p$  este de o secundă de arc, distanța la stea este:

$$d = \frac{1}{p}$$

Simplitatea acestei expresii este motivul pentru care este utilizată. De exemplu, cea mai apropiată stea, Proxima Centauri, are o paralaxă de  $0,76''$ , ceea ce corespunde unei distanțe de 1,31 pc, echivalentă cu 4,28 a.l. Prima observare a paralaxei efectuată pentru o stea (61 Cygni) a fost realizată de Bessel în anul 1838, deși la acel moment se considera că stelele ar fi atât de depărtate încât distanțele respective nu ar putea fi măsurate corect.

De regulă, utilizăm paralaxa pentru a măsura distanțele până la stelele care se află până la 300 ani lumină față de noi. La distanțe mai mari decât aceasta, unghiul de paralaxă este neglijabil și de aceea trebuie să utilizăm alte metode pentru a calcula distanțele. Acestea se bazează, în general, pe comparația cu alte stele a căror distanță este cunoscută prin metoda paralaxei. Paralaxa oferă o bază pentru alte măsurători de distanțe din astronomie, scara distanțelor cosmice. Paralaxa este, de regulă, prima treaptă a acestei scări de distanță.

## Activitatea 2: Legea $1/r^2$

Se poate utiliza un experiment simplu pentru a înțelege relația dintre luminozitate, strălucire și distanță. Acesta va arăta că magnitudinea aparentă este o funcție de distanță. Așa cum este ilustrat în figura 11, se va utiliza un bec electric și un carton (sau o cutie) cu un mic orificiu pătrat tăiat în aceasta. Cartonul cu orificiul pătrat este plasat de o parte a becului electric. Becul electric radiază lumină în toate direcțiile. O anumită cantitate de lumină trece prin orificiu și iluminează un ecran mobil aflat paralel cu cartonul gărit. Pe ecran sunt reprezentate pătrate având aceeași dimensiune ca orificiul din carton. Cantitatea de lumină care trece prin orificiu și care ajunge la ecran nu depinde de cât de departe este situat ecranul. Dacă așezăm

ecranul mai departe, aceeași cantitate de lumină trebuie să acopere o suprafață mai mare și, în consecință, strălucirea pe ecran scade. Pentru a simula o sursă punctuală și a reduce umbrele putem, de asemenea, să plasăm un al treilea carton cu orificiu foarte aproape de becul electric. Oricum, fiți atenți să nu așezați cartonul prea aproape de becul electric pentru prea mult timp, deoarece s-ar putea aprinde.

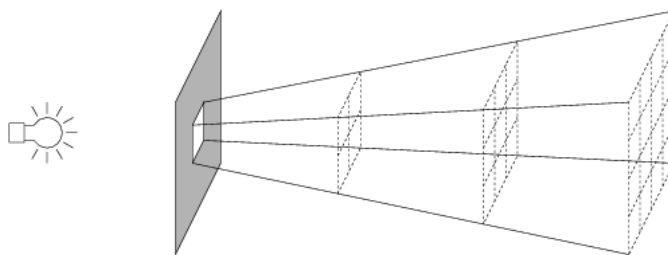


Fig. 4: Montajul experimental

Este evident că atunci când distanța dintre ecran și becul electric se dublează, suprafața care este iluminată devine de patru ori mai mare. Aceasta implică faptul că intensitatea luminii (lumina care ajunge pe unitatea de suprafață) devine a patra parte din cantitatea inițială. Dacă se triplează distanța, suprafața de pe ecran pe care se împrăștie, lumina devine de nouă ori mai mare, deci intensitatea luminii va fi a noua parte din cantitatea inițială. Astfel, putem spune că intensitatea este invers proporțională cu pătratul distanței față de sursă. Cu alte cuvinte, intensitatea este invers proporțională cu suprafața totală pe care se distribuie radiația, care este o sferă cu aria suprafeței  $4\pi D^2$ .

## Sistemul de magnitudini

Să ne imaginăm că o stea este ca un bec electric. Strălucirea depinde de puterea stelei sau a becului electric și de distanța de la care o vedem. Acest comportament poate fi verificat așezând, în partea opusă unei foi de hârtie, o lampă: cantitatea de lumină care ajunge pe foaia de hârtie depinde de puterea becului și de distanța dintre foaie și bec. Lumina provenită de la bec este împrăștiată în mod uniform pe suprafața unei sfere care are o arie de  $4\pi R^2$ , unde  $R$  este distanța dintre cele două obiecte. Prin urmare, dacă se dublează distanța ( $R$ ) între foaia de hârtie și becul electric (figura 5), intensitatea care ajunge la foaia de hârtie nu este jumătate ci este un sfert (aria pe care s-a distribuit lumina este de patru ori mai mare). Dacă se triplează distanța, atunci intensitatea care ajunge pe foaia de hârtie este a noua parte (aria sferei pe care este distribuită lumina este de nouă ori mai mare).

Strălucirea unei stele poate fi definită ca intensitatea (sau fluxul) de energie care ajunge pe o suprafață cu aria de un metru pătrat aflată pe Pământ (figura 5). Dacă luminozitatea (sau puterea) unei stele este  $L$ , atunci:

$$B = F = \frac{L}{4\pi D^2}$$

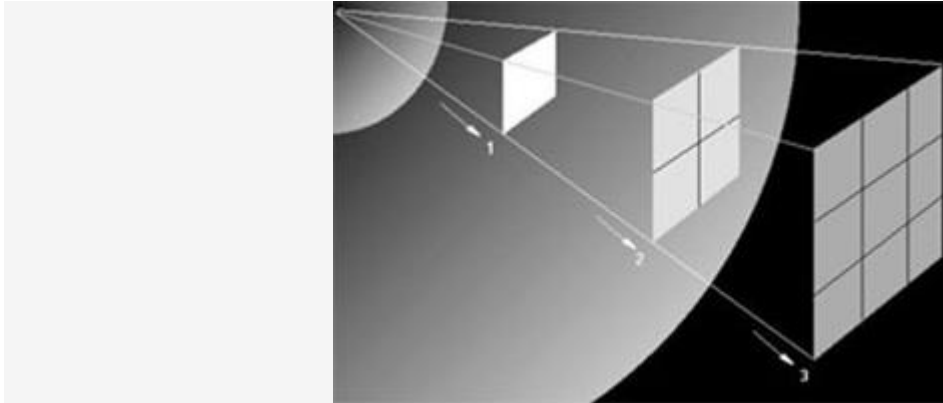


Fig. 5: Lumina devine cu atât mai puțin intensă cu cât sursa sa este mai îndepărtată

Deoarece strălucirea depinde de intensitatea și distanța față de stea, putem vedea că o stea care luminează slab, care este mai apropiată, poate fi observată ca având aceeași strălucire ca o stea mai luminoasă dar care se află la o distanță foarte mare.

Hiparh din Samos, în al doilea secol d.H., a întocmit primul catalog stelar. El a clasificat cele mai strălucitoare stele ca stele având magnitudinea 1, iar cele mai slabe stele ca având magnitudinea 6. El a inventat un sistem de divizare a strălucirii stelelor care este utilizat și în zilele noastre, deși a fost ușor reorganizat cu ajutorul unor măsurători mai precise decât au putut fi realizate cu ochiul liber.

O stea cu magnitudinea 2 este mai strălucitoare decât o stea cu magnitudinea 3. Există stele care au magnitudinea 0 și există chiar stele cu magnitudini negative, cum ar fi Sirius, care are magnitudinea -1,5. Extinzând scara la obiecte chiar și mai strălucitoare, Venus are o magnitudine vizuală -4, Luna plină are magnitudinea -13, iar Soarele are magnitudinea -26,8.

Aceste valori sunt numite, în mod corect, magnitudini aparente  $m$ , deoarece ele par să măsoare strălucirea stelelor așa cum se văd ele de pe Pământ. Această scară respectă regula că o stea cu magnitudinea 1 este de 2,51 ori mai strălucitoare decât o stea cu magnitudinea 2, iar această stea este de 2,51 ori mai strălucitoare decât o altă stea cu magnitudinea 3 etc. Aceasta înseamnă că o diferență de 5 magnitudini între două stele este echivalentă cu o stea cu o magnitudine mai mică fiind de  $2,51^5 = 100$  ori mai strălucitoare. Această relație matematică poate fi exprimată ca:

$$\frac{B_1}{B_2} = (\sqrt[5]{100})^{m_2 - m_1} \quad \text{sau} \quad m_2 - m_1 = 2.5 \log\left(\frac{B_1}{B_2}\right)$$

Magnitudinea aparentă  $m$  este o măsură corelată cu fluxul de lumină într-un telescop, flux care provine de la o stea. De fapt,  $m$  se calculează din fluxul  $F$  și o constantă  $C$  (care depinde de unitățile fluxului și de banda de observare) prin expresia:

$$m = -2,5 \log F + C$$

Această ecuație ne spune că cu cât fluxul este mai mare, cu atât va fi mai negativă magnitudinea stelei. Magnitudinea absolută  $M$  se definește ca magnitudinea aparentă  $m$  pe care ar avea-o un obiect dacă ar fi văzut de la o distanță de 10 parseci.

Pentru a transforma magnitudinea aparentă într-o magnitudine absolută este necesar să cunoaștem distanța exactă până la stea. Uneori acest lucru este o problemă deoarece distanțele în astronomie sunt deseori dificil de determinat precis. Dacă distanța  $d$  exprimată în parseci este cunoscută, magnitudinea absolută  $M$  a stelei poate fi calculată folosind ecuația:

$$M = m - 5 \log d + 5$$

## Culoarea stelelor

Se știe că stelele au diferite culori. La o primă vedere, cu ochiul liber, putem distinge variații între culorile stelelor dar diferențele între culorile stelelor sunt chiar mai evidente când stelele sunt observate cu ajutorul binoculului și al fotografiilor. Stelele se clasifică în funcție de culoarea lor; aceste clasificări se numesc tipuri spectrale și se notează: O, B, A, F, G, K, M. (figura 6).



Fig. 6: Tipurile spectrale ale stelelor, în funcție de culoarea lor

Conform legii lui Wien (figura 7), o stea care are peak-ul intensității sale maxime în domeniul luminii albastre corespunde unei temperaturi mai ridicate, în timp ce dacă o stea are peak-ul intensității maxime în domeniul luminii roșii este mai rece. Cu alte cuvinte, culoarea unei stele indică temperatura la suprafața acelei stele.

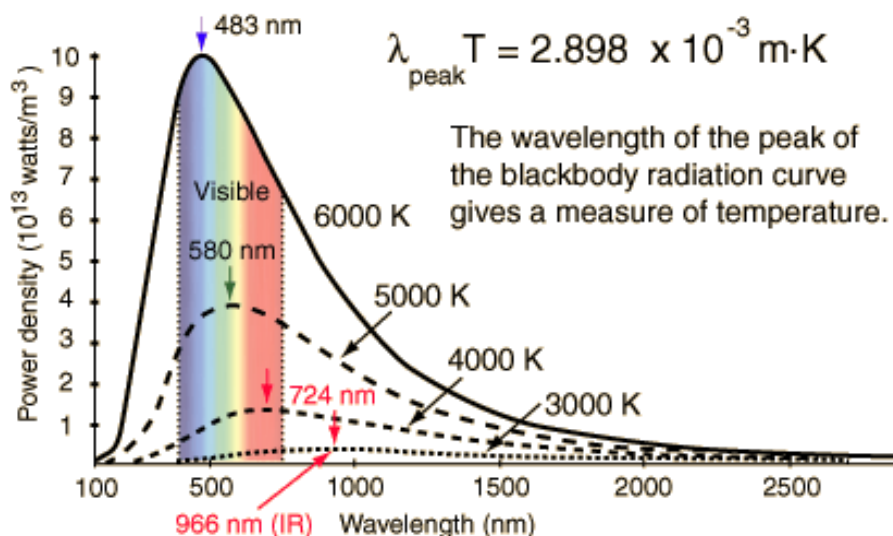


Fig. 7: Dacă temperatura crește, peak-ul intensității stelei se deplasează de la roșu spre albastru.

### Activitatea 3: Culoarea Stelelor

În primul rând, vom utiliza o lampă simplă cu incandescență care are un rezistor variabil pentru a ilustra radiația de corp negru. Prin așezarea de filtre colorate între lampă și spectroscop elevii pot examina lungimea de undă a luminii transmise prin filtre. Comparând aceasta cu spectrul lămpii, elevii pot demonstra faptul că filtrele absorb anumite lungimi de undă. Apoi, pentru a înțelege culorile stelelor, elevii pot utiliza un dispozitiv similar cu cel din figura 3, care are lumină albastră, roșie și verde și este echipat cu potențiometre. Acest dispozitiv poate fi construit cu ajutorul unor lămpi, ale căror tuburi sunt realizate din hârtie neagră mai groasă, iar deschiderea opusă becului este acoperită cu foi de celofan colorat. Folosind acest dispozitiv, putem analiza figura 2 și să încercăm să reproducem efectul creșterii temperaturii stelare. La temperaturi joase steaua emite, în cantități semnificative, numai lumină roșie.

Dacă temperatura crește atunci vor exista și emisii de lumină cu lungimi de undă care trec prin filtrul verde. Pe măsură ce această contribuție devine tot mai importantă, culoarea stelei va trece prin portocaliu la galben. Când temperatura crește, lumina cu lungimi de undă care trec prin filtrul albastru devine mai importantă și, din această cauză, culoarea stelei devine albă. Dacă intensitatea luminii cu lungimea de undă în domeniul albastru continuă să crească, astfel încât devine semnificativ mai mare decât intensitățile corespunzătoare luminii cu lungimea de undă care trece prin filtrele roșu și verde, steaua devine albastră. Pentru a evidenția acest ultim pas este necesar să se reducă intensitatea luminii lămpii pentru roșu și verde în cazul în care se folosește puterea maximă a lămpilor pentru a produce lumina albă.

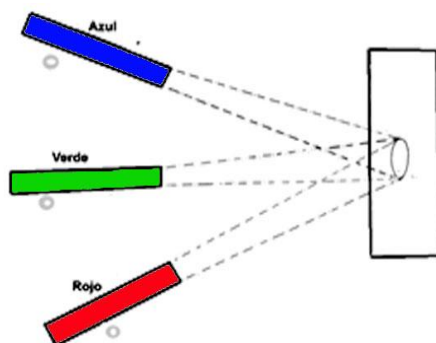


Fig. 8a: Dispozitivul necesar pentru explicarea culorii stelelor.

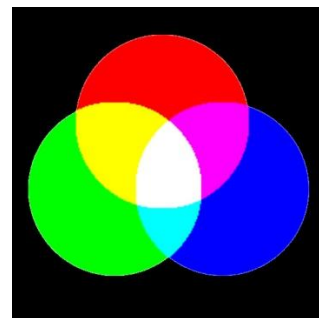


Fig. 8b: Proiecție pentru explicarea culorii stelelor și producerea albului.

### De unde știm că stelele evoluează?

Stelele pot fi așezate pe o diagramă Hertzsprung-Russell (figura 9a) care ilustrează grafic intensitatea stelelor (luminozitatea sau magnitudinea absolută) în funcție de temperatura sau de culoarea stelelor. Stelele reci au o luminozitate mai redusă (partea din dreapta jos a graficului); stelele fierbinți sunt mai strălucitoare și au o intensitate mai mare (partea din stânga sus a graficului). Această succesiune a stelelor care formează o secvență de stele pornind de la temperaturi joase / luminozitate redusă până la temperaturi înalte / luminozitate

mare este cunoscută sub numele de *secvența principală*. Unele stele care sunt mai evoluate s-au "deplasat în afara" secvenței principale. Stelele care sunt foarte fierbinți dar care au o luminosități redusă se numesc pitice albe. Stelele care au temperaturi reduse dar care sunt foarte strălucitoare se numesc *supergigante*.

În timp, o stea poate evolua și se poate "deplasa" în diagrama HR. De exemplu, Soarele (situat în centru) aflat la finalul vieții sale va deveni o gigantă roșie. După acel moment, Soarele va expulza straturile sale exterioare și va deveni, în final, o pitică albă ca în figura 9b.

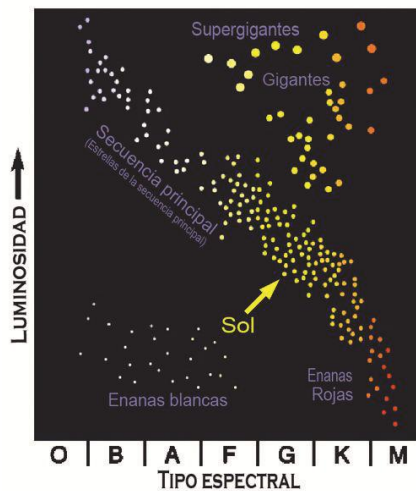


Fig. 9a: Diagrama H-R



Fig. 9b: Soarele își va expulza atmosfera sa externă și se va transforma într-o pitică albă asemănătoare celor care există în centrul nebuloaselor planetare

## Activitatea 4: Vârsta roiurilor deschise

Să analizăm imaginea (figura 10) roiului Jewel Box sau Kappa Crucis, din constelația Crucii Sudului.



Fig. 10: Imaginea roiului Jewel Box

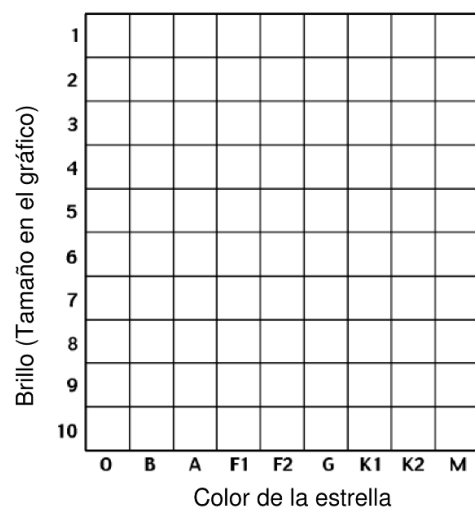


Fig. 11: Fișă de lucru



Este evident că nu toate stelele au aceeași culoare. De asemenea, este dificil să se spună unde se termină un roi de stele. Indică în figura 10 unde crezi tu că se termină roiul.

În aceeași figură 10, notează cu un "X" locul în care crezi tu că se află centrul roiului. Apoi, folosește o riglă pentru a măsura și trasează un pătrat cu o latură de 4 cm în jurul centrului. Măsoară strălucirea celei mai apropiate stele față de colțul din stânga sus al pătratului pe care l-ai trasat, pe baza dimensiunii sale, comparată cu dimensiunile comparative care sunt prezentate în ghidul de pe marginea figurii 4. Estimează culoarea stelei cu ajutorul ghidului pentru compararea culorilor, situat în partea stângă a figurii 10. Marchează cu un punct culoarea și dimensiunea primei stele de pe fișa de lucru culoare-strălucire (figura 11).

Țineți minte faptul că pe axa x este culoarea, iar pe axa y este strălucirea (dimensiunea). După ce ați marcat prima stea, repetați procesul de măsurare și marcarea a culorii și strălucirii (dimensiunii) pentru toate stelele cu suprafața de 4 cm.

Stelele din roiul Jewel Box ar trebui să urmeze, pe graficul realizat, o anumită configurație, ca în figura 11. În figura 10, există, de asemenea, stele care sunt situate înaintea și în spatele roiului și care, de fapt, nu fac parte din acesta. Astronomii le numesc "câmp stelar". Dacă aveți timp, puteți încerca să estimați cât de multe stele din câmpul stelar au fost incluse în aria de 4 cm<sup>2</sup>, care a fost utilizată în analiza anterioară și să se estimeze culoarea și strălucirea acestora. Pentru a realiza acest lucru, se localizează câmpul stelar în diagrama culoare-magnitudine și se marchează cu "x" în loc de punct. Rețineți că un câmp stelar are o distribuție haotică pe grafic și că nu pare să formeze nici o configurație specifică.

Majoritatea stelelor sunt situate în reprezentarea grafică pe o bandă care este situată pornind din partea stângă sus până în partea dreaptă jos. Cele mai puțin masive stele sunt cele mai reci și apar ca având culoarea roșie. Cele mai masive stele sunt cele mai fierbinți și cele mai strălucitoare și apar ca având culoarea albastră. Această bandă de stele de pe diagrama culoare-magnitudine este numită "secvența principală". Stelele de pe secvența principală sunt clasificate în clase care încep cu clasa O (cele mai strălucitoare, mai masive și mai fierbinți: cca 40.000 K) până la clasa M (cele mai puțin strălucitoare, mai puțin masive și cu cea mai mică temperatură superficială: cca 3500 K).

Pe cea mai mare parte a duratei vieții unei stele, aceleași forțe interne care produc energia stelei sunt și cele care stabilizează steaua împiedicând colapsul acesteia. Atunci când o stea își epuizează combustibilul, acest echilibru este rupt și imensa forță gravitațională a stelei determină colapsul și moartea acesteia.

Tranziția între viața pe secvență și colaps este o parte a ciclului stelar, numit stadiul de "gigantă roșie". Stelele care sunt gigante roșii sunt strălucitoare, deoarece au diametre stelare care pot fi cuprinse în intervalul de la de 10 la mai mult de 300 ori dimensiunea Soarelui. Gigantele roșii au această culoare deoarece temperatura suprafeței lor este redusă. Pe foaia de lucru pot fi clasificate ca stele K sau M, dar ele sunt foarte strălucitoare. Cele mai masive stele își consumă mult mai rapid combustibilul față de stelele cu masa mai mică și de aceea sunt primele care părăsesc secvența principală și devin gigante roșii. Datorită dimensiunii lor mari, care poate fi de peste 1000 de diametre ale Soarelui, gigantele roșii cu mase între 10 și 50 de

mase solare se numesc “supergigante roșii” (sau hipergigante roșii dacă ele provin din stele din clasa O). Gigantele roșii se dilată și se răcesc, devenind roșii și strălucitoare și de aceea sunt situate în partea dreaptă sus a diagramei culoare-magnitudine. Cu cât roiul devine mai bătrân, numărul de stele care părăsesc secvența principală pentru a deveni gigante roșii crește. De aceea, vârsta unui roi de stele poate fi determinată prin culoarea celei mai mari și mai strălucitoare stele care mai rămâne pe secvența principală.

Multe stele aflate în roiuri bătrâne au evoluat dincolo de stadiul de gigante roșii la un alt stadiu: ele au devenit pitice albe. Piticele albe sunt stele foarte mici care au dimensiunea aproximativ egală cu dimensiunea Pământului. Ele luminează, de asemenea, foarte slab și de aceea nu pot fi văzute în această imagine a roiului Jewel Box.

Puteți estima vârsta unei stele din roiul Jewel Box pornind de la reprezentarea grafică din figura 11, comparând-o cu graficele roiurilor de stele de vârste diferite, prezentate în figurile 12a, 12b și 12c?

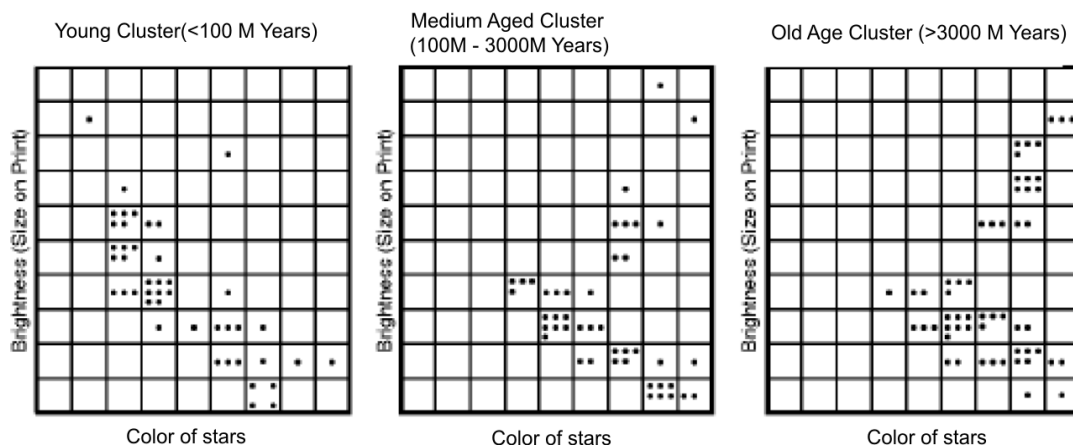


Fig. 12a, 12b, și 12c: Diagrame HR de referință pentru roiuri

## Moartea stelelor

Sfârșitul vieții unei stele depinde de masa stelei la naștere, așa cum se poate vedea din figura 13.

La un anumit punct în evoluția unui roi de stele cele mai masive stele dispar din diagrama Hertzsprung-Russell. În timp ce stelele de masă mai mică vor evolua în pitice albe, aceste stele masive își vor sfârși viețile lor prin unul din cele mai violente fenomene în univers: supernove. Rămășițele acestui fel de fenomene vor fi obiecte care nu au emisie termică (pulsari și găuri negre) și de aceea nu sunt vizibile în diagrama Hertzsprung-Russell.

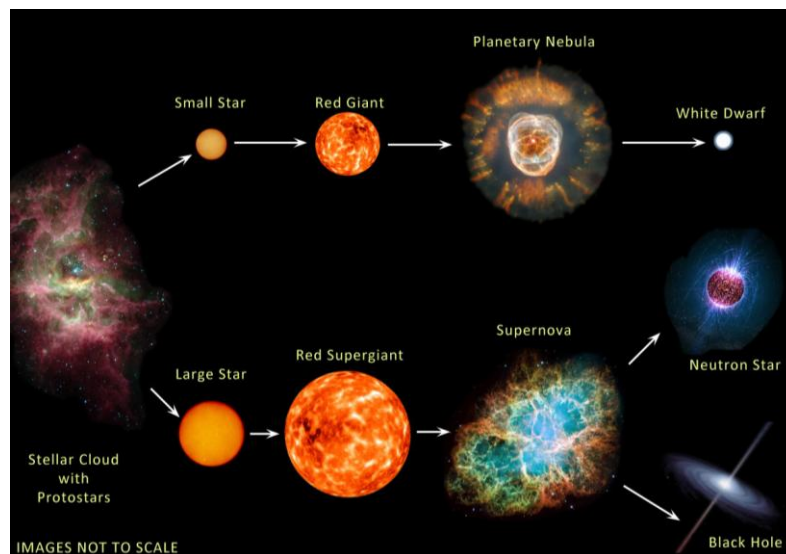


Fig. 13: Evoluția stelelor în funcție de masa lor.

## Ce este o supernovă?

Moartea unei stele masive din secvența principal stelară este caracterizată de fuziunea hidrogenului pentru a produce heliu, urmată apoi de producerea de carbon și ajungând la elemente mai grele. Produsul final este fierul. Fuziunea fierului nu este posibilă deoarece această reacție are nevoie să absoarbă energie pentru a se desfășura, în loc să degajeze energie.

Fuziunea diferitelor elemente se desfășoară până când respectivele elemente există în cantități suficiente și sunt consumate complet. Acest proces de fuziune are loc din exterior spre miez, astfel încât, după un timp, steaua dobândește o structură stratificată asemănătoare oarecum cu o ceapă (figura 14b), având elementele mai grele în straturile aflate mai adânc, mai aproape de miezul stelei.

O stea având masa egală cu masa a 20 mase Solare parcurge aceste stadii:

10 milioane de ani arderea hidrogenului în miez (secvența principală)

1 milion de ani arderea heliului

300 de ani arderea carbonului

200 de zile arderea oxigenului

2 zile pentru a consuma siliciul: explozia tip supernova este iminentă.

Când steaua are în sfârșit un miez din fier, atunci nu mai sunt posibile alte reacții nucleare. În absența presiunii radiației care rezultă în urma fuziunii necesare pentru a echilibra gravitația, colapsul stelei este inevitabil, fără posibilitatea inițierii niciunei reacții nucleare noi. Pe durata colapsului, nucleele atomice și electronii sunt împinși unii spre ceilalți pentru a forma neutroni, iar parte centrală a miezului devine o stea neutronică.

Stelele neutronice sunt atât de dense încât o linguriță de ceai ar cântări cât toate clădirile dintr-un oraș mare. Deoarece neutronii sunt presați între ei, contracția nu mai poate continua. Particulele care cad spre interior dinspre straturile exterioare ale stelei, având viteze de aproximativ un sfert din viteza luminii, lovesc miezul neutronic și sunt frânate brusc. Acest proces le determină să revină înapoi sub forma unei unde de șoc, rezultând unul dintre cele mai energetice procese cunoscute în univers (figura 14a): o singură stea care explodează poate depăși ca strălucire o întreagă galaxie formată din miliarde de stele.

Pe durata acestui proces reorganizarea energiilor este atât de mare încât se creează unele elemente mai grele decât fierul (de ex. plumb, aur, uraniu etc.). Aceste elemente emerg violent pe durata exploziei și sunt expulzate împreună cu toată materia exterioară a stelei. În centrul materialului expulzat rămâne o stea neutronică rotindu-se cu o viteză mare sau, dacă steaua inițială a fost suficient de masivă, rezultă o gaură neagră.

## Activitatea 5: Simularea unei explozii de supernovă

Atunci când o stea explodează ca o supernovă, atomii ușori din straturile exterioare cad spre elementele mai grele din interior și, în final, lovesc miezul solid central. Un model simplificat al acestui proces poate fi reprezentat într-un mod simplu și spectaculos cu ajutorul unei mingi de baschet și al unei mingi de tenis, așezate deasupra și lăsate să cadă împreună pe o suprafață rigidă, cum ar fi podeaua (figura 15). În acest model, podeaua reprezintă miezul dens stelar, mingea de baschet reprezintă un atom greu care revine dinspre miez și împinge atomul ușor din spatele său, reprezentat de mingea de tenis.



Fig. 15: Lăsăm să cadă în același moment atât mingea de tenis cât și mingea de baschet.

Pentru a prezenta modelul, țineți mingea de baschet la nivelul ochilor cu mingea de tenis exact deasupra ei, cât mai vertical posibil. Lăsați cele două mingi să cadă deodată. Se pot face predicții că ambele mingi vor reveni la aceeași înălțime de la care au căzut sau că vor reveni la o înălțime mai redusă datorită frecării și energiei disipate în urma ciocnirii cu podeaua. Oricum, rezultatul este destul de surprinzător.

Când se lasă cele două mingi să cadă, acestea sosesc aproape simultan pe podea. Mingea mare se ciocnește elastic și revine cu aproximativ aceeași viteză pe care a avut-o când a atins podeaua. În acel moment aceasta se ciocnește cu mingea mai mică de tenis, minge care a căzut cu aceeași viteză ca și mingea de baschet. Mingea de tenis ciocnește mingea de baschet

cu o viteză mare și ajunge mult mai sus decât înălțimea de la care au fost lăsate să cadă mingile. Dacă se repetă acest experiment folosind un număr mare de mingi chiar și mai ușoare, vitezele lor de revenire ar fi fantastice.

În prezentarea modelului, mingea de tenis revine la o înălțime de două ori mai mare decât înălțimea inițială de la care au căzut cele două mingi. De fapt, fiți atenți să nu spargeți ceva dacă realizați acest experiment în interior.

Acest experiment poate fi realizat în sala de clasă sau într-o altă încăpăre închisă, dar este preferabil ca acesta să fie realizat în spațiu deschis. Poate fi realizat și de la o fereastră aflată la înălțime, dar atunci ne-ar fi mai greu să ne asigurăm că mingile cad vertical și că mingile se poate ciocni și sări cu o forță mai mare în direcții nepredictibile.

Unele magazine de jucării sau magazine ale muzeelor de știință vând o jucărie numită "Astro Blaster" jucărie a cărei funcționare se bazează pe același principiu. Jucăria constă din patru mici mingi din cauciuc de diferite dimensiuni legate printr-o axă. Mingile mai mici cad în aer, revenind după ce sistemul lovește solul. Această jucărie poate fi găsită la adresa: <http://www.exploreco.es>

## Ce este o stea neutronică?

O stea neutronică este ceea ce rămâne dintr-o stea masivă după ce a suferit procesul de colaps și a expulzat straturile sale exterioare prin o explozie de supernovă. Stelele neutronice nu au de obicei mai mult de câteva zeci de kilometri. Așa cum sugerează și numele, ele constau din neutroni împachetați împreună până la o densitate incredibilă: doar un degetar din această materie ar cântări milioane de tone.

O stea neutronică se formează dacă partea care rămâne dintr-o supernovă este între 1,44 și cca 8 mase solare.

## Ce este un pulsar?

Un pulsar este o stea neutronică care se rotește cu o viteză extrem de mare (figura 16). Când o stea masivă suferă colapsul, straturile exterioare cad spre miez și încep să se rotească mai repede, datorită conservării momentului cinetic. Acest comportament este similar cu mișcarea unui patinator care se rotește tot mai repede ca urmare a apropiării brațelor de corp.

Câmpul magnetic al stelei generează o emisie puternică de radiație electromagnetică de sincrotron pe direcția axei sale. Deoarece axa câmpului magnetic nu coincide de obicei cu axa de rotație (așa cum este și cazul Pământului), steaua neutronică rotitoare acționează ca un gigantic far cosmic. Dacă această emisie se nimerește să fie direcționată spre Pământ, noi vom detecta un puls la intervale de timp regulate.

În anul 1967, Bell și Hewish au descoperit primul pulsar. Semnalul pulsator a venit dintr-un punct din spațiu în care nu fusese observat nici un corp care să pulseze în lumină vizibilă.

Repetarea rapidă a pulsurilor a fost uimitoare – de câteva ori pe secundă, cu o precizie uimitoare.



Fig. 16: Un pulsar este o stea neutronică în rotație.

În primul moment s-a crezut că pulsurile ar putea fi semnale inteligente extraterestre. Apoi, în timp, au fost descoperite mai multe surse radio pulsatoare, inclusiv centrul nebuloasei Crabului. Oamenii de știință știau că această nebuloasă a fost produsă de o supernovă și că ar putea explica originea pulsarilor. Pulsarul PSR B1937+21 este unul dintre cei mai rapizi pulsari cunoscuți și se rotește de 600 de ori într-o secundă. Acesta are diametrul de cca 5 km și, dacă s-ar roti cu cca 10% mai repede, atunci ar fi distrus de forța centrifugă. Hewish a câștigat premiul Nobel în anul 1974.

Un alt pulsar foarte interesant este un sistem binar numit PSR 1913+16 din constelația Vulturului. Mișcarea orbitală mutuală a stelelor într-un câmp gravitațional foarte intens produce unele ușoare întârzieri în emisiile pe care le recepționăm. Russell Hulse și Joseph Taylor au studiat acest sistem și au confirmat multe predicții ale teoriei relativității, inclusiv emisia undelor gravitaționale. Cei doi americani au fost recompensați pentru cercetările lor cu premiul Nobel în anul 1993.

## Activitatea 6. Simularea unui pulsar

Un pulsar este o stea neutronică care este foarte masivă și care se rotește rapid. Acesta emite radiații, dar sursa nu este complet aliniată cu axa de rotație, astfel încât fasciculul de radiații emis se rotește ca un far. Dacă acest fascicul este orientat spre Pământ, se observă un puls de radiație de câteva ori pe secundă.

Putem simula un pulsar cu ajutorul unei lanterne (figura 17a) legată cu o sfoară de tavan. Dacă răsucim sfoara și o lăsăm să se rotească liber (figura 17b), atunci vom vedea lumina intermitent de câte ori lanterna este îndreptată spre noi (figura 17c).

Dacă se înclină lanterna astfel încât să nu fie orizontală, atunci nu vom mai putea vedea fasciculul de lumină din aceeași poziție. De aceea, putem să observăm emisiile unui pulsar numai dacă suntem aliniați cu axa sa de rotație.

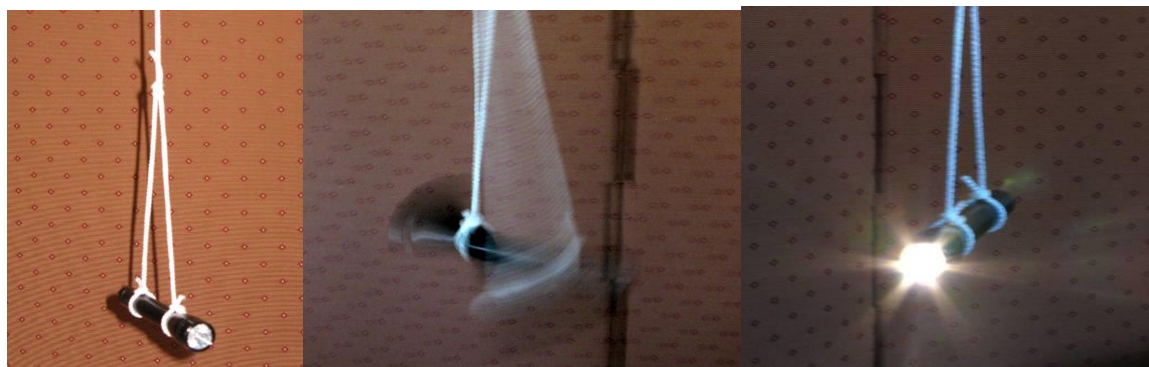


Fig. 17a: Vedere de ansamblu; Fig. 17b: Rotirea lanternei; Fig.17c: Pe măsură ce se rotește observăm fasciculul de lumină periodic

## Ce este o gaură neagră?

Dacă aruncăm o piatră în sus, gravitația îi încetinește mișcarea până când aceasta revine înapoi pe sol. Dacă aruncăm piatră cu o viteză inițială mai mare, atunci piatră va urca mai sus înainte de a cădea jos. Dacă viteza inițială este 11 km/s, viteza de evadare de pe Pământ, piatră nu ar mai cădea înapoi jos (presupunând că nu există frecarea cu aerul).

Dacă Pământul ar fi suferit un proces de colaps păstrându-și masa, viteza de evadare la suprafața sa ar crește deoarece ar fi mai aproape de centrul Pământului. Dacă procesul de colaps are loc până la o rază de 0,8 cm, viteza de evadare ar deveni mai mare decât viteza luminii. Deoarece nici un corp nu poate depăși viteza luminii, nimic nu ar putea să scape de pe suprafață, nici măcar lumina. Pământul ar deveni o gaură neagră de dimensiunea unei mici pietricele.

Teoretic, este posibil ca găurile negre să aibă mase foarte mici. În realitate, există numai un singur mecanism cunoscut care să poată concentra masa până la densitățile necesare: colapsul gravitațional. Pentru a avea loc colapsul gravitațional, este necesară o masă foarte mică. Știm că stelele neutronice sunt rămășițele stelelor cu masa între 1,44 și 8 mase solare. Dacă steaua inițială este și mai masivă, gravitația este atât de puternică încât interiorul său poate continua să colapseze până ce devine o gaură neagră. De aceea, acest tip de gaură neagră va fi impresionantă. O mică pietricică din materie cu această densitate ar cântări la fel de mult ca Pământul.

Deși nu le putem observa direct, cunoaștem în univers câțiva candidați de găuri negre prin intermediul emisiei din materialul care are o mișcare de revoluție cu viteză mare în jurul găurii negre. De exemplu, exact în centrul galaxiei noastre nu vedem nimic, dar putem detecta un inel de gaz răsucindu-se cu o viteză incredibilă în jurul centrului. Singura explicație posibilă este aceea că există o imensă masă invizibilă în centrul acestui inel, cântărind cât trei sau patru milioane de sori. Aceasta poate fi numai o gaură neagră cu o rază Schwarzschild ușor mai mare decât a Soarelui nostru. Aceste tipuri de găuri negre care sunt situate în centrul multor galaxii sunt numite găuri negre supermasive.

## Activitatea 7. Simularea curburii spațiului și a gării negre

Este ușor de simulat curbura bidimensională a spațiului creată de o gaură neagră folosind o bucată din fibre elastice Lycra (figura 18) sau o bucată mare de pânză.



Fig. 18: Traectoria mingii de tenis nu este o linie dreaptă ci o curbă.

Mai întâi întindeți foaia de fibre. Apoi rostogoliți o mică minge (sau pietricică) de-a lungul foii. Aceasta reprezintă un foton de lumină iar traiectoria sa simulează traseul drept al unei raze de lumină în absența curburii. Dacă se așează o minge grea în centrul foii și apoi rostogolim o minge mai mică, traseul său va urma o curbă. Aceasta simulează traseul unei raze de lumină într-un spațiu curbat, curbura fiind cauzată de prezența unei mase gravitaționale. Gradul în care se curbează traiectoria razei de lumină depinde de cât de aproape trece fasciculul de lumină față de masa gravitațională și de cât de masiv este corpul respectiv. Unghiul de deflecție este direct proporțional cu masa și invers proporțional cu distanța. Dacă alegem să reducem tensiunea în foaie, aceasta simulează o gravitație mai mare, care va face și mai dificilă ieșirea micii mingi din apropierea centrului. În această situație avem un model al unei găuri negre.

## Bibliografie

- Broman, L., Estalella, R. Ros. R.M, *Experimentos en Astronomía*. Editorial Alhambra Longman, Madrid, 1993.
- Dale, A.O., Carroll, B.W, *Modern Stellar Astrophysics*, Addison-Wesley Publ. Comp., E.U.A, 1996.
- Moreno, R, *Experimentos para todas las edades*, Ed. Rialp. Madrid, 2008.
- Pasachoff, J.M, *Astronomy: From the Earth to the Universe*, 6th Edition, Cengage, USA, 2002.
- Rybicki, G.B., Lightman, A.P, *Radiative Processes in Astrophysics*, John Wiley & Sons, EUA, 1979.
- Zeilik, M, *Astronomy-The Evolving Universe*, 8<sup>th</sup> Ed., John Wiley & Sons, USA, 1997.