

Vida de les Estrelles

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

Astronomical Internacional Unión, Escola Secundària de Loulé (Portugal),
Universidad Tecnológica Nacional (Mendoza, Argentina), Colegio Retamar
(Madrid, España), Universitat Politècnica de Catalunya (Barcelona, España)

Resum

Per comprendre la vida de les estrelles cal entendre què són, com podem saber a quina distància estan, com evolucionen i quines són les diferències entre elles. A través d'experiments senzills es pot ensenyar als alumnes el treball que van fer els científics per estudiar la composició de les estrelles, i també realitzar alguns models simples.

Objectius

Aquest taller complementa la conferència general d'evolució estel·lar d'aquest llibre presentant diferents activitats i demostracions. Els principals objectius són els següents:

- Entendre la diferència entre la magnitud aparent i magnitud absoluta.
- Entendre el diagrama de Hertzsprung-Russell fent un diagrama color-magnitud.
- Comprendre els conceptes, com ara supernova, estrella de neutrons, púlsars, i forat negre.

Activitat 1: Concepte de Paral·laxi

Un concepte que s'usa per calcular distàncies en astronomia és la paral·laxi. Anem a fer una activitat molt senzilla que ens permetrà entendre-ho. Posem-nos davant d'una paret a una certa distància, en la qual hi hagi punts de referència: armari, quadres, portes, etc. Estirem el braç davant nostre, i posem el dit polze vertical (figures 1a i 1b).

Si tanquem ara l'ull dret, veurem a el dit sobre, per exemple, el centre d'un quadre. Sense moure el dit, vam obrir l'ull dret i tanquem l'esquerre. El dit ara apareix desplaçat sobre el fons: ja no coincideix amb el centre sinó amb la vora del quadre.

Per aquesta raó, quan observem el cel des de dos ciutats allunyades, els cossos propers, per exemple la Lluna, apareixen desplaçats respecte a les estrelles del fons, que estan molt més llunyanes. El desplaçament és més gran com més separats estiguin els llocs des d'on es prenen les observacions. Aquesta distància es diu línia de base.

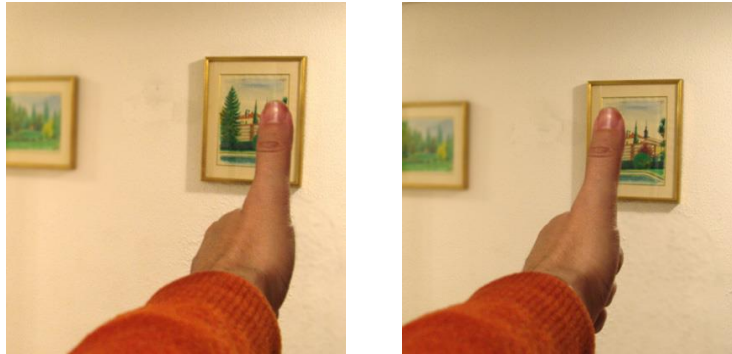


Fig. 1a: Amb el braç estès mirem la posició de l'polze respecte a el fons, primer amb l'ull esquerre (tancant el dret) i després a l'inrevés, Fig. 1b: el mirem amb l'ull dret (amb l'esquerre tancat).

Càlcul de distàncies a les estrelles per Paral·laxi

Paral·laxi és el canvi aparent en la posició d'un objecte, quan es mira des de diferents llocs. La posició d'una estrella propera sobre el fons molt més llunyà sembla canviar quan es veu des de dues ubicacions diferents. Així podem determinar la distància a les estrelles properes.

Perquè la paral·laxi sigui apreciable, es pren com a distància a base la major possible, que és el diàmetre de l'òrbita terrestre al voltant del Sol (figura 2).

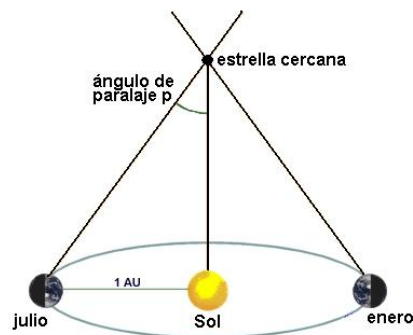


Fig. 2: L'angle de paral·laxi p és l'angle sota el qual es veu la distància Terra-Sol des de l'estrella.

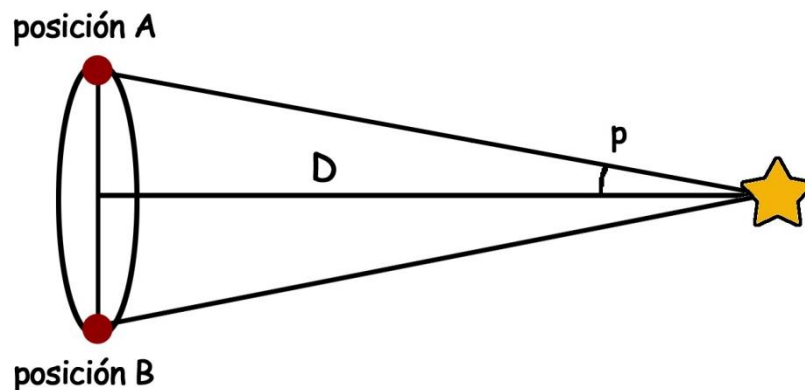


Fig. 3: Conegut l'angle es pot calcular la distància D a l'objecte.

Per exemple, si observem un estel pròxima respecte al fons estrellat, des de dues posicions A i B de l'òrbita terrestre (figura 3), separades per sis mesos, podrem calcular la distància D a la qual es troba l'estrella propera, deduïnt:

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

Com p és un angle molt petit, la seva tangent es pot aproximar a l'angle mesurat en radiants:

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

La base del triangle AB / 2 és la distància Terra-Sol, és a dir 150 milions de km. Si tenim l'angle de paral·laxi p, la distància a l'estrella, en quilòmetres serà $D = 150.000.000 / p$, amb l'angle p expressat en radiants. Per exemple, si l'angle p és un segon d'arc, la distància de l'estrella serà:

$$D = \frac{150000000}{2\pi/(360\ 60\ 60)} = 30939\ 720937\ 064\ km = 3,26\ a.l.$$

Aquesta és la unitat de distància utilitzada en l'astronomia professional. Si una estrella es veïés amb una paral·laxi d'un segon d'arc, es diria que està a 1 parsec (parsec), que equival a 1pc = 3,26 anys llum. Com més petit sigui la paral·laxi, més gran és la distància de l'estrella. La relació entre distància (en pc) i paral·laxi (en segons d'arc) és:

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

La senzillesa d'aquesta expressió és la raó per la que s'usa tant. Per exemple, l'estrella més propera és Pròxima Centauri, té una paral·laxi de 0 "76, pel que està a una distància de 1,31 pc, que equival a 4,28 a l. La primera observació de paral·laxi d'una estrella (61 Cygni) ho va fer Bessel en 1838. Encara que se sospitava que les estrelles estaven molt llunyanes, fins llavors no es va poder mesurar amb certa precisió la distància de les estrelles.

Actualment, s'usa la paral·laxi per mesurar distàncies d'estrelles que disten fins a uns 300 anys llum. Més enllà la paral·laxi és inapreciable, i cal usar altres mètodes, però que es basen en general en comparar les estrelles llunyanes amb altres la distància se sap per paral·laxi. Per tant és bàsic el concepte de paral·laxi en astronomia.

Activitat 2: Llei de la inversa del quadrat

Un experiment senzill serveix per a comprendre la relació entre la lluminositat, la brillantor, i la distància a la qual està una font lluminosa. Així es comprendrà que la magnitud és una funció de la distància. Com es mostra en el diagrama de la figura 4, utilitzarem una bombeta de llum, i en un costat de la bombeta se situa una cartolina amb una obertura quadrada. La llum de la bombeta s'estén en totes direccions. Una certa quantitat de llum passa a través de l'obertura i incideix en una pantalla mòbil col·locada paral·lela a la cartolina. La quantitat total de llum que passa a través de l'obertura i que arriba a la pantalla, no depèn d'on posem la

pantalla. Però a mesura que situem la pantalla més lluny, aquesta quantitat fixa de llum ha de cobrir una àrea més gran, i conseqüentment la brillantor sobre la pantalla disminueix. Per tenir una font puntual i disminuir les ombres en les vores del quadrat de llum es pot utilitzar una tercera cartolina amb un forat, pròxima de la bombeta (no es pot fer servir massa temps perquè podria cremar).

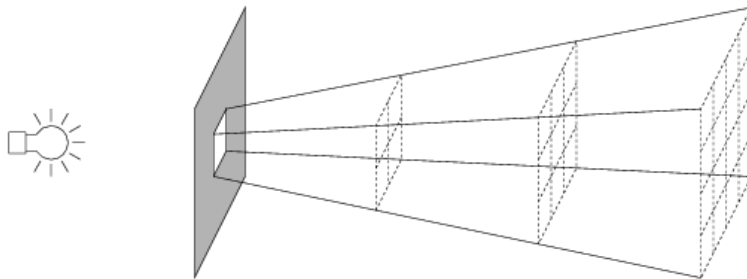


Fig. 4: Fonament de l'experiment

S'observa que quan la distància passa a ser el doble, l'àrea sobre el qual incideix llum passa a ser quatre vegades més gran, després la intensitat lluminosa (la llum que arriba per unitat d'àrea) passarà a ser un quart. Si la distància es triplica, l'àrea sobre el qual incideix la llum passa a ser nou vegades més gran, després la intensitat lluminosa passarà a ser un novè. Així, es pot dir que la intensitat és inversament proporcional a el quadrat de la distància a la font, o millor, es pot dir que és inversament proporcional a l'àrea total que la radiació travessa, que és una esfera d'àrea $4\pi D^2$.

El sistema de magnituds

Imaginem una estrella com una bombeta encesa. La brillantor amb la qual la veiem depèn de la seva potència i de la distància des d'on la vegem. Això es pot comprovar posant un full de paper enfront de la bombeta: la quantitat de llum que li arriba dependrà de la potència de la bombeta, i de la distància del full a la bombeta. La llum de la bombeta s'ha de repartir entre la superfície d'una esfera, que és $4\pi R^2$. Per això, si dupliquem la distància del full de paper a la bombeta (figura 5), la intensitat que li arriba no és la meitat, sinó la quarta part (l'àrea de l'esfera entri a què cal repartir la llum és quatre vegades més gran). I si la distància es triplica, la intensitat que li arriba és la novena part (l'àrea de l'esfera entri a què cal repartir la llum és nou vegades més gran).

Podríem definir la brillantor d'una estrella com la intensitat (o flux) d'energia que arriba a un paper d'un metre quadrat situat a la Terra (figura 5). Si la lluminositat (o potència) de l'estrella és L , llavors imaginem una estrella com una bombeta encesa. La brillantor amb la qual la veiem depèn de la seva potència i de la distància des d'on la vegem. Això es pot comprovar posant un full de paper enfront de la bombeta: la quantitat de llum que li arriba dependrà de la potència de la bombeta, i de la distància del full a la bombeta. La llum de la bombeta s'ha de repartir entre la superfície d'una esfera, que és $4\pi R^2$. Per això, si dupliquem la distància del full de paper a la bombeta (figura 5), la intensitat que li arriba no és la meitat, sinó la quarta part (l'àrea de l'esfera entri a què cal repartir la llum és quatre vegades més gran). I si la distància es triplica, la intensitat que li arriba és la novena part (l'àrea de l'esfera entri a què cal repartir la llum és nou vegades més gran).

Podríem definir la brillantor d'una estrella com la intensitat (o flux) d'energia que arriba a un paper d'un metre quadrat situat a la Terra (figura 5). Si la lluminositat (o potència) de l'estrella és L , llavors:

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

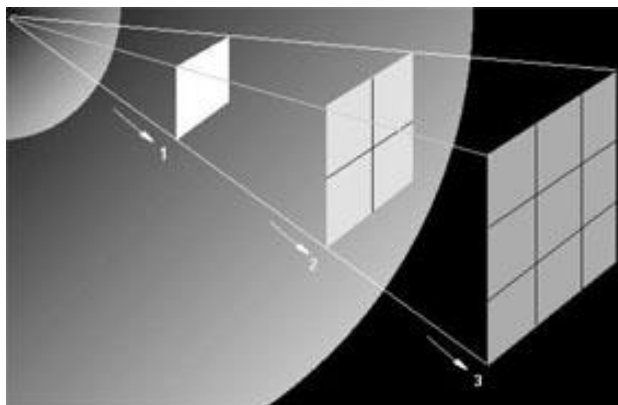


Fig. 5: La llum arriba amb menys intensitat com més allunyat s'està.

Però com depèn de la lluminositat i de la distància, podem veure amb igual brillantor una estrella petita propera i una altra més lluminosa i llunyana.

Hiparc de Samos, al segle II a.C., va fer el primer catàleg d'estrelles. Va classificar a les més brillants com de 1^a magnitud i les més febles, de 6^a. Així va inventar un sistema de divisió de brillantors de les estrelles que encara està vigent avui, encara que lleugerament retocat amb mesures més precises que les realitzades a simple vista.

Un estel de magnitud 2 és més brillant que una altra de magnitud 3. N'hi ha fins i tot de magnitud 0 i de magnitud negativa, com Sirià, que té magnitud -1,5. Prolongant l'escala, Venus arriba a adquirir magnitud -4, la Lluna plena -13, i el Sol -26,8.

Aquests valors són anomenats pròpiament magnituds aparents m , ja que mesuren la brillantor que aparenten tenir les estrelles vistes des de la Terra. Es va adoptar la regla que un estel de magnitud 1 és 2,51 ($=\sqrt[5]{100}$) vegades més brillant que una altra de magnitud 2, aquesta 2,51 vegades més que una altra de magnitud 3, etc. Això fa que una diferència de 5 magnituds sigui equivalent a $2,51^5 = 100$ vegades més brillant. Aquesta relació matemàtica pot expressar-se així:

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

La magnitud aparent m d'una estrella és una mesura que està relacionada amb el flux F d'energia (mesurable amb un fotòmetre, i equivalent a la brillantor B) que arriba als telescopis

des d'una estrella i d'una constant que depèn de les unitats de flux i de la banda d'observació C :

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

L'expressió anterior permet verificar que com més gran sigui el flux, més negativa serà la magnitud. Un altre concepte més interessant és el de magnitud absoluta M : és la magnitud aparent m que tindria un estel si estigués a una distància de 10 parsecs. Amb la quantitat absoluta M podem comparar els "brillantors reals" de dues estrelles o el que és equivalent, la seva potència o lluminositat.

Per convertir la magnitud aparent en magnitud absoluta és necessari conèixer la distància a l'estrella i aquest és un dels majors problemes, ja que les distàncies en astronomia solen ser difícils de determinar. No obstant això si un sap la distància en parsecs d a l'estrella pot obtenir la quantitat absoluta M a través de l'equació:

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

Els colors de les estrelles

És un fet que les estrelles presenten diversos colors. A simple vista es distingeixen variacions entre elles, però encara més amb prismàtics i amb fotografia. Els tipus d'estrelles segons els seus colors es diuen tipus espectrals, i són: O, B, A, F, G, K, M. (figura 6).



Fig. 6: Tipus espectrals d'estrelles, segons els colors.

D'acord amb llei de Wien (figura 7), a l'analitzar la llum que ens arriba d'una estrella, el màxim de la intensitat de l'emissió és més blau com més gran sigui la temperatura, i més vermell com més freda. Dit d'una altra manera, el color de l'estrella ens indica la temperatura de la seva superfície.

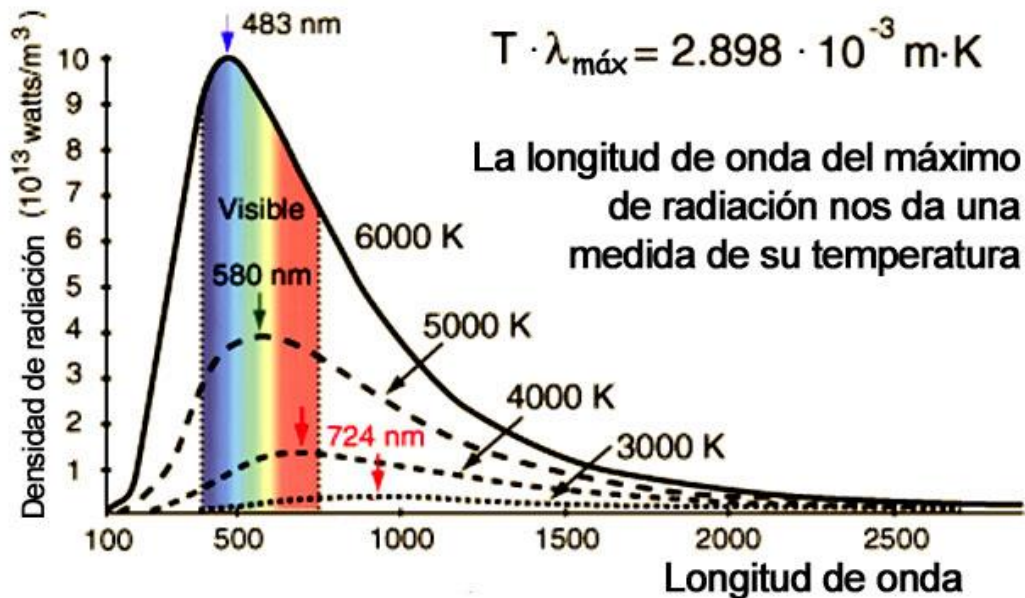


Fig. 7: Segons augmenta la temperatura de l'estrella, el màxim es desplaça de l'vermell cap al blau

Activitat 3: Colors de les estrelles

Els estudiants poden entendre el color de les estrelles utilitzant un aparell similar al presentat esquemàticament a la figura 8a. Són tres llanternes (o tres mòbils) a les que s'ha tret el mirall parabòlic que tenen al costat de la bombeta, se'ls ha posat un tub de cartolina negra amb un filtre a l'extrem de cel·lofana de color blau en una, verd en una altra i vermell a la tercera.

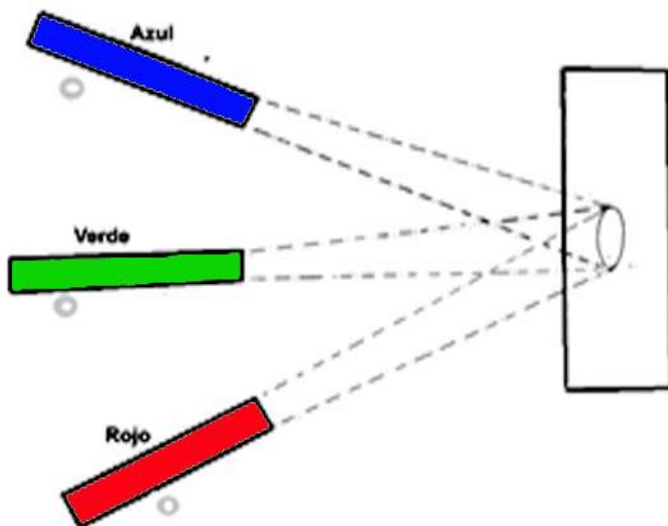


Fig. 8a: Esquema de l'aparell per explicar el color de les estrelles.



Fig. 8b: Aspecte de la projecció per explicar la llum de color blanc.

Podem analitzar la figura 8b i intentar reproduir l'augment de la temperatura de les estrelles. Per baixes temperatures l'estrella només té vermell. Si la temperatura augmenta hi haurà

també emissió en el verd, i l'estrella passarà pel taronja i el groc. A partir d'aquí són importants les longituds d'ona blaves i l'estrella va passant a ser blanca. Si la intensitat de les longituds d'ona del blau és més gran que les intensitats de les longituds d'ona del vermell i del verd l'estrella passa a ser blavosa. Per demostrar aquest últim pas serà necessari allunyar el vermell i el verd per reduir la seva intensitat per produir el blanc.

Com sabem que les estrelles evolucionen

Les estrelles es poden agrupar en un diagrama de Hertzsprung-Russell (figura 9a). Les estrelles fredes tindran poca lluminositat (a baix a la dreta), els molt calents tindran molta lluminositat (a dalt a l'esquerra). Si té molta temperatura i poca lluminositat és que són nanes blanques. Si tenen poca temperatura i molta lluminositat és que són supergegants.

Amb el temps, una estrella pot evolucionar i "mourer's" al diagrama H-R. Per exemple, el Sol (al centre) a la fi de la seva vida s'inflarà i passarà de ser una geganta vermella, Després expulsarà la capa externa i es convertirà en una cançó de bressol blanca, com la de la figura 9b.

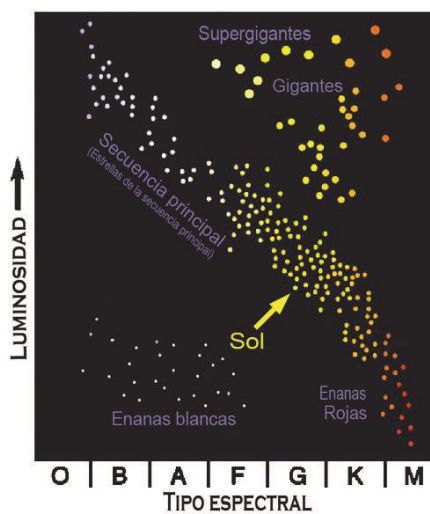


Fig. 9a: Diagrama H-R



Fig. 9b: El Sol expulsarà la seva capa externa i es convertirà en una nana blanca, com la que hi ha al centre d'aquesta nebulosa planetària

Activitat 4: L'edat dels cúmuls oberts

Examina la fotografia de la figura 10, de la Caixa de Joies, o Kappa Crucis, a la constel·lació de la Creu de Sud.

És clar que no totes les estrelles són del mateix color i és difícil decidir on acaba el cúmul d'estrelles. Sobre la figura 10, marca el lloc on creus que el cúmul acaba o està el seu límit.



Fig. 10: Imatge de la Caixa de Joies

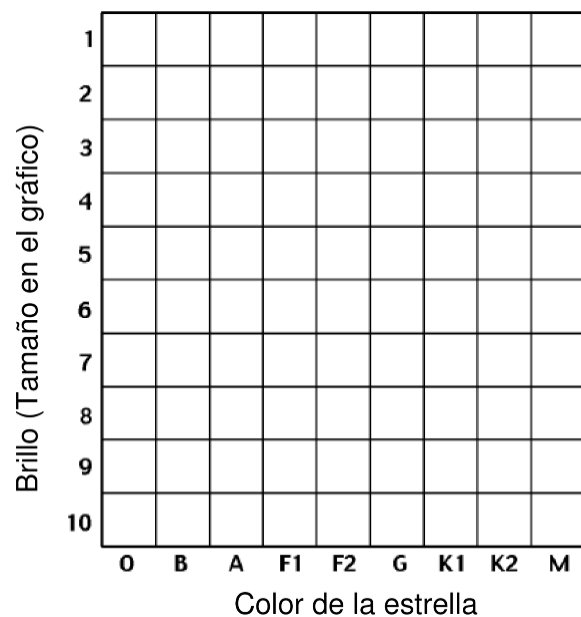


Fig. 11: Full de Treball

A la mateixa figura 10, indica amb una "X" el lloc on creus que es troba el centre de l' cúmulo estel·lar i utilitza una regla per mesurar i dibuixar un quadrat de 4 cm de costat entorn aquest centre. Mesura la brillantor de l'estrella més propera a la cantonada superior esquerra de la quadrat, a partir de la seva grandària comparant-lo amb els punts de comparació en la guia en el marge de la figura 10. Estima el color de l'estrella amb ajuda de la guia de colors de comparació situat al marge de la figura 10. Situa aquesta estrella, dibuixant un punt, a la plantilla gràfica de la figura 11, on estan indicats color i magnitud com abscissa i ordenada, respectivament, el color i la magnitud del teu primera estrella. Indica l'estrella que ja vas dibuixar a la figura 10 i procedeix a mesurar color i brillantor de tots els estels dins el quadrat de 4 cm.

Les estrelles de la Caixa de Joies apareixen al gràfic ajustant-se aproximadament a una certa estructura. La major part d'elles ocupen una banda que va des de l'extrem superior esquerre en el gràfic fins a l'extrem inferior dret. A la imatge de la figura 10, també apareixen estrelles que es troben davant i darrere de l' cúmulo obert i no són part. Els astrònoms anomenen a aquestes estrelles "estrelles de camp". Si tens temps, tracta d'estimar quantes estrelles de camp has inclòs en el quadrat de 4 cm de costat i estima el seu color i brillantor. Situa les estrelles de camp en el diagrama color-magnitud, indicant-les amb una X minúscula, en lloc d'un punt. Observa que les estrelles de camp es distribueixen en el gràfic més o menys a l'atzar, no semblen formar cap estructura.

Les estrelles menys massives són més fredes (vermelles). Les estrelles més massives són calents (blaus) i brillants. Aquesta "banda" formada per estrelles es denomina "seqüència principal". A aquestes estrelles es les classifica des de O (les més brillants, més massives i de major temperatura: al voltant de 40.000 K) fins a M (les menys brillants, de poca massa i de molt baixa temperatura: uns 3500 K).

Les estrelles romanen estables un període important de les seves vides. Durant el mateix, la gravetat força a l'estrella cap al col·lapse, i les forces internes, associades amb la producció d'energia, produeixen una pressió que tracta de compensar aquest col·lapse. Quan les estrelles envelleixen, l'equilibri entre atracció gravitatòria i pressió de radiació es perd, això porta a l'estrella cap a la seva mort.

El límit entre la vida i la mort d'una estrella, és una part del seu cicle, un estat denominat de "gegant vermella". Les gegants vermelles són brillants perquè tenen un diàmetre que és entre 10 i més de 300 vegades el del Sol i se les veu vermelles perquè són fredes. Se les classifica com estrelles K o M en el full de treball, però són molt brillants. Les estrelles més massives, esgoten el seu combustible molt ràpid i són les primeres que abandonen la seqüència principal per transformar-se en gegants vermelles. Per la seva enorme dimensió, que pot ser de l'ordre de 1000 vegades la del Sol en diàmetre, les gegants vermelles de les estrelles amb masses compreses entre 10 i 50 masses solars, són anomenades "super gegants vermelles" (híper gegants vermelles en el cas de les que tinguessin origen en un estel de classe O). S'expandeixen i refreden, tornant-se brillants i vermelles i es mouen cap a la regió superior dreta del diagrama. A mesura que el cúmulo es fa més i més vell, més quantitat de estrelles abandonaran la seqüència principal per transformar-se en gegants vermelles. Els astrònoms afirmen que l'edat del cúmulo pot determinar pel color de l'estrella més brillant, la més massiva, que encara roman en la seqüència principal.

Moltes estrelles de cúmuls vells han evolucionat més enllà de la seqüència de gegants vermelles, a un altre estat denominat nanes blanques. Però les nanes blanques són molt petites, de la mida de la Terra i molt febles i per això no podem veure-les en aquesta imatge de la caixa de Joies.

Pots, finalment, estimar l'edat del cúmulo obert La Caixa de Joies (figura 10) utilitzant el joc de gràfics de les figures 12a, 12b i 12c, comparant-los amb el teu propi?

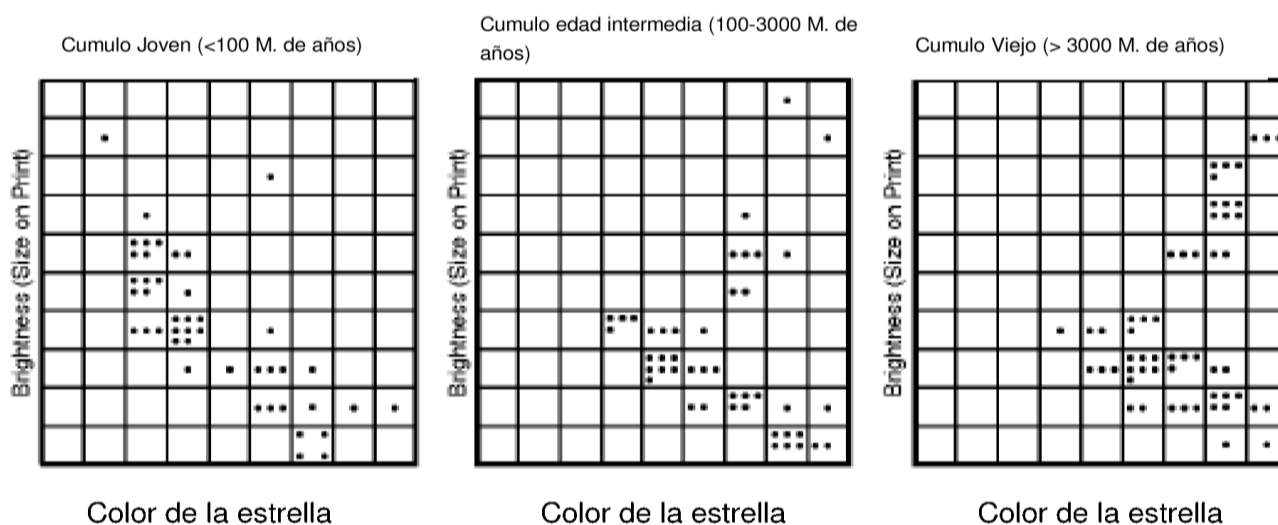


Fig. 12a, 12b y 12c: Cúmuls de comparació

Coneixent el diagrama HR i sabent que en ell es relacionen el color (o temperatura superficial) amb la brillantor (o lluminositat) de les estrelles i que tots dos factors poden estar relacionats amb l'edat, és possible explicar el grau d'evolució dels cúmuls que es proveeixen i comparar les vides relatives de les estrelles O / B amb les A / F / G i les K / M, ja que es pot advertir que segons sigui la massa de les estrelles, aquestes evolucionaran en el mateix temps, l'edat del cúmulo, de manera diferent.

D'aquesta manera es comprèn que la taula esquerra de la figura 12c correspon a un cúmulo jove (té estrelles O / B en la seqüència principal, i sabem que les O / B evolucionen i abandonen aquesta regió molt ràpid) i la taula de la dreta correspon a un vell (amb estrelles K / M en seqüència principal, però amb les estrelles més massives evolucionades).

Es podria preguntar-nos: Quin seria el lloc que li correspondria al Sol en el diagrama HR? El Sol, una estrella amb temperatura superficial de 5870°K, produeix el màxim de radiació al voltant de la color groc, correspondria al tipus G2 (abscisses), mentre que el seu estat evolutiu és aquell en on s'està fusionant l'hidrogen en el seu nucli per transformar-se en heli, és a dir, la seqüència principal, classe de lluminositat V, la regió de major concentració d'estrelles en el diagrama HR.

Mort de les estrelles

El final d'una estrella depèn de la massa de la nebulosa inicial, com es veu a la figura 13:

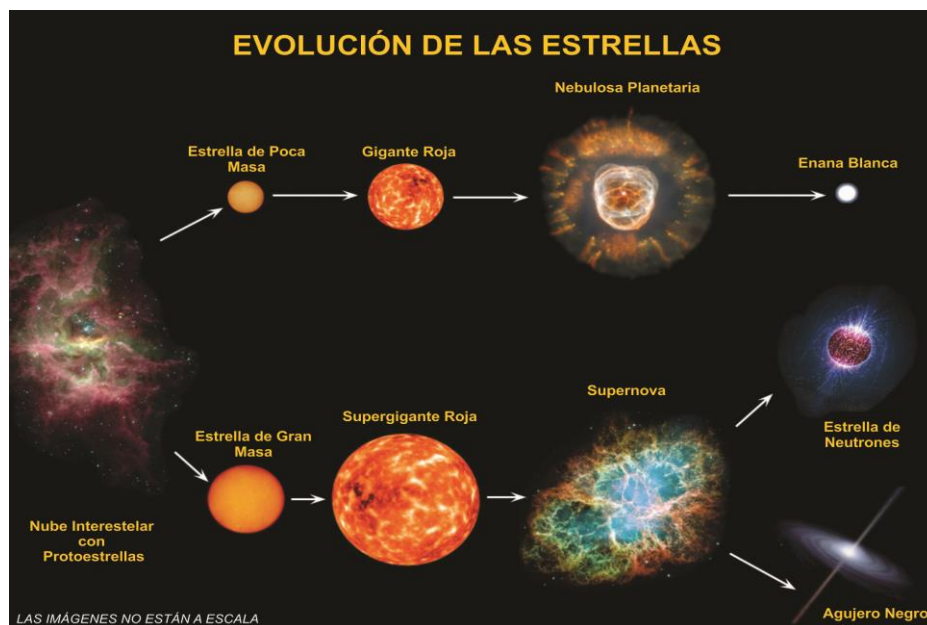


Fig 13: Evolució de les estrelles segons la seva massa.

En un determinat moment de l'evolució dels cúmuls estel·lars, les estrelles de major massa desapareixen del diagrama de Hertzsprung-Russell. Mentre que les més petites van a originar nanes blanques, les majors donaran origen a un dels més violents fenòmens de l'Univers: una

supernova. Els residus que sobren (púlsars i forats negres) van ser objectes que no té emissió tèrmica i per això no són visibles en el diagrama de Hertzsprung Russell.

Què és una supernova?

És la mort d'una estrella molt massiva. L'estrella comença per la fusió de l'hidrogen per produir heli, passant després a la producció de carboni i així successivament produint elements cada vegada més pesats. El producte final és el ferro, la fusió no és possible perquè en lloc d'expulsar energia hauria de absorbir-la.

Les diferents ignicions es produeixen sempre al centre, quan encara queda material a la perifèria, de manera que l'estrella va adoptant una estructura en capes, anomenada estructura de ceba (figura 14b), amb elements més pesats segons anem aprofundint.

Una estrella de 20 masses solars dura:

- 10 milions d'anys cremant hidrogen en el seu nucli (seqüència principal)
- 1 milió d'anys cremant l'heli
- 300 anys el carboni
- 200 dies l'oxigen
- 2 dies en consumir el silici: l'explosió de la supernova és imminent.



Fig. 14a: Restes d'una supernova.

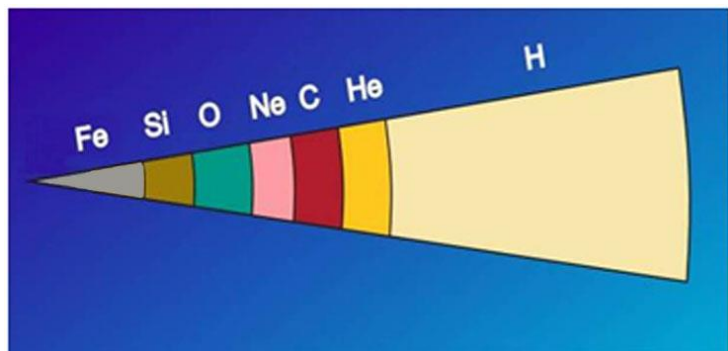


Fig. 14b: Estructura en capes de l'interior d'una estrella abans d'explotar com una supernova.

Quan només hi ha ferro en el centre, no són possibles més reaccions nuclears i sense la pressió de radiació l'estrella té un inevitable col·lapse gravitatori sobre si mateixa, però aquest cop sense possibilitat d'encendre ja res. En aquesta caiguda dels nuclis atòmics i els electrons es van ajuntant formant a l'interior neutrons que s'apilen. En aquest moment, tota la part central de l'estrella consisteix en neutrons en contacte amb els altres, amb una densitat tal que una culleradeta pesaria tant com tots els edificis d'una gran ciutat junts. I com que els neutrons estan en contacte amb els altres, la matèria no pot contreure més i la caiguda a velocitats de l'ordre de la quarta part de la velocitat de la llum s'atura de cop, produint un rebot cap enrere en forma d'ona de xoc que és un dels processos més energètics que es coneix en l'Univers (figura 14a): un sol estel en explosió pot brillar més que una galàxia sencera, composta per milers de milions d'estrelles.

En aquest rebot es produeixen els elements més pesats que el ferro, com el plom, l'or, l'urani, etc., que surten violentament acomiadats juntament amb tota la part externa de l'estrella. A l'interior queda un estel de neutrons girant a gran velocitat, o un forat negre.

Activitat 5: Simulació de l'explosió d'una supernova

Quan una estrella esclata com supernova, els àtoms lleugers de les capes externes cauen sobre àtoms més pesats de l'interior, i aquests reboten al massís nucli de central.

Un model simplificat pel rebot dels àtoms pesats contra el nucli massís, i el d'aquests contra els més lleugers que venen darrere caient des de les capes superficials d'aquesta gegantesca ceba (figura 14b), es pot representar de forma fàcil i un tant espectacular amb una pilota de bàsquet i una pilota de tennis, deixant-los caure junts sobre un terreny dur (figura 15).

En aquest model, el sòl representa el nucli massís de l'estrella de neutrons, la pilota de bàsquet seria un àtom pesat que rebot, i al seu torn empeny a l'àtom lleuger que ve darrere d'ell, representat per la bola de tennis.



Fig. 15: Deixem caure alhora una pilota de bàsquet i una de tennis

Per realitzar el model, se situa la pilota de bàsquet a l'altura dels nostres ulls, a sobre la pilota de tennis, el més vertical possible i es deixen caure les dues alhora. Si prèviament se li pregunta a algú l'altura a la qual creu que arribaran després del rebot, probablement ens digui que a la inicial, o fins i tot una mica menys pels fregaments. No obstant això el resultat és molt diferent. En deixar-les anar, arriben gairebé a el mateix temps a terra. La pilota gran rebot elàsticament, i retrocedeix pràcticament amb la mateixa velocitat que ha arribat. En aquest moment xoca amb la petita pilota de tennis, que baixa amb la mateixa velocitat amb la qual la pilota puja i la petita surt comiat a gran velocitat cap amunt, i arriba molt més alt. Si aquests xocs es repetissin amb més pilotes, cada vegada més lleugeres, que caiguessin en la mateixa direcció, les velocitats que s'aconseguirien serien fantàstiques. En la pràctica la pilota petita arriba a sobrepasar el doble de l'altura a la qual es deixen caure les dues. De fet si es fa en una habitació, cal anar amb compte perquè no doni a la llum de sostre o en algun altre objecte delicat.

Aquest experiment es pot fer a classe o en un altre lloc tancat, tot i que és preferible fer-ho a l'aire lliure. Es podria fer des d'una finestra alta, però és difícil que la pilota de tennis caigui perfectament vertical, de manera que sortirà comiat amb gran força en una direcció imprevisible, i pot produir trencaments en objectes propers

En algunes botigues de joguines o botigues de Museus de la Ciència venen una joguina anomenat "Astro Blaster", basat en els mateixos principis. Es compon de quatre petites boles de goma, de diferent grandària, unides per un eix, l'última de les quals surt disparada al rebotar a terra.

Què és un estel de neutrons?

És el cadàver d'una estrella molt gran, que ha col·lapsat, i s'ha després de la seva escorça en una explosió de supernova. No sol ser molt més gran que algunes desenes de quilòmetres i està formada per un munt de neutrons apilats un costat d'un altre, amb una densitat increïble: un simple didal d'aquesta matèria pesaria milions de tones. Si el romanent té més de 1.44 masses solars i fins prop de 8 masses solars, llavors es pot formar una estrella de neutrons.

Què és un púlsar?

És un estel de neutrons que gira amb extraordinària rapidesa (figures 16). Com són el final d'una estrella gran, la seva matèria, al concentrar-se, augmenta la seva velocitat de gir, igual que un patinador que recull els seus braços. El camp magnètic de l'estrella crea unes fortes emissions electromagnètiques. Però com el camp magnètic no sol coincidir amb l'eix de gir - igual que passa a la Terra- aquesta emissió gira com un gegantí far còsmic. Si el raig d'emissió escombria la Terra, vam detectar unes pulsacions a un ritme molt regular.

El 1967 Hewish i Bell van descobrir el primer púlsar, en un punt on no s'observava res en llum visible. El cridaner era la ràpida repetició de polsos, diverses vegades per segon, amb una precisió sorprenent.



Fig. 16: Un púlsar és un estel de neutrons en rotació

Durant un temps es va pensar que eren senyals d'extraterrestres intel·ligents. Després es van descobrir més radiofonts polsants, entre d'altres la de centre de la nebulosa del Cranc,

produïda per una supernova, i es va poder explicar la seva procedència. El primer PSR B1937 + 21 és un dels púlsars més ràpids coneguts gira més de 600 vegades per segon. Té prop de 5 km de diàmetre i si girés només un 10% més ràpid, es trencaria per la força centrífuga.

Un altre molt interessant és binari, anomenat PSR 1913 + 16, en la constel·lació d'Àguila. El moviment orbital mutu en uns camps gravitatoris tan intensos produeix uns petits retards en les emissions que rebem. Hulse i Taylor els han estudiat i confirmen molts postulats de la teoria de la relativitat, entre d'altres l'emissió d'ones gravitacionals. Aquests dos americans van rebre el Premi Nobel el 1993 per aquests estudis.

Activitat 6: Simulació d'un púlsar

Un púlsar és un estrell de neutrons, molt massissa, que gira molt ràpidament. Emet radiació, però la font no està totalment alineada amb l'eix de gir, de manera que l'emissió dóna voltes com un far de la costa. Si està orientat cap a la Terra, el que veiem és una radiació que prem diverses vegades per segon, i l'anomenem púlsar.

Podem simular amb una llanterneta (figura 17a) lligada amb una corda al sostre. Si la encenem i la fem girar (figura 17b), veurem la llum de forma intermitent cada vegada que la llanterneta apunta en la nostra direcció (figura 17c). Podem inclinar una mica la llanterneta perquè no estigui horitzontal. Al girar, des de la nostra posició ja no veiem la llum. Només la veiem si estem ben alineats amb el gir del púlsar.



Fig. 17a: Muntatge

Fig. 17b: Girem la llanterneta

Fig. 17c: Veiem la seva llum intermitent

Què és un forat negre?

Si llancem una pedra cap amunt, la força de la gravetat va frenant fins que torna de nou a nosaltres. Si la velocitat amb què la llancem és més gran, vam aconseguir altures elevades, i si és 11 km / s, velocitat d'escapament del nostre planeta, aconseguiríem que no tornés a caure.

Si la Terra es contragués mantenint la seva massa, la velocitat d'escapament en la seva superfície seria més gran, ja que estaríem més a prop de el centre de la Terra. Si es concentrés fins a un radi de 0,8 cm, la velocitat d'escapament seria una mica més gran que la de la llum.

Com res pot sobrepassar aquesta velocitat, res escaparia de la seva superfície, ni tan sols la llum. S'hauria convertit en un forat negre de la mida d'una bala.

Teòricament pot haver forats negres de masses molt petites, però només coneixem un mecanisme perquè la massa es concentri tant: el col·lapse gravitatori, i per això es necessiten masses molt grans. Ja hem vist la formació d'estrelles de neutrons com cadàvers d'estrelles de 1.44 masses solars fins a prop de 8 masses solars, però si l'estrella originària és encara més gran, la gravetat és tal que el seu interior es col·lapsa sobre si mateixa disminuint encara més el seu volum i transformant-se en un forat negre. Per això, un primer tipus de forats negres coneguts tenen masses majors que diverses vegades el nostre Sol. La seva densitat és impressionant. Una bala feta de la seva matèria pesaria com tota la Terra.

Tot i que no es veuen, s'han detectat diversos candidats a forats negres a l'Univers gràcies a altres objectes visibles que giren en la seva òrbita a gran velocitat. Per exemple, just al centre de la nostra galàxia no veiem res, però sí vam detectar un anell de gasos que giren al seu voltant a grandíssimes velocitats. Això necessita en el seu centre una gegantina massa de tres o quatre milions de sols, que només pot ser un forat negre de ràdio mica més gran que el nostre Sol. Aquest és un altre tipus de forats negres, que estan situats al centre de moltes galàxies.

Activitat 7: Simulació de la curvatura de l'espai i d'un forat negre

És molt senzill simular la curvatura de l'espai determinada per un forat negre usant un tros de teixit elàstic: licra (figura 18), o també la malla que venen en farmàcies per fixar apòsits sobre el cos humà.



Fig. 18: La trajectòria de la bola de tennis no és en línia recta sinó una corba

Estenem la tela o la malla. Vam llançar rodant una pilota més lleugera (o una bala), i veiem que la seva trajectòria simula la trajectòria rectilínia d'un raig de llum. Però si col·loquem una pilota pesada (p.ex. un globus ple d'aigua) o una bola de ferro al centre de la tela i llancem rodant la pilota (o la bala), la seva trajectòria seguirà una corba a la tela, simulant la trajectòria d'un raig de llum que ja no segueix una línia recta com abans. El grau d'aquesta desviació depèn del prop que passi el raig de llum de el cos central i del massiu que sigui aquest. L'angle de desviació és directament proporcional a la massa i inversament proporcional a la

distància. Si afluïxem una mica la tensió de la tela, es produeix una mena de pou gravitacional, de el qual és difícil que surti la bola lleugera. Seria un model de forat negre.

Bibliografia

- Broman, L., Estalella, R. Ros. R.M, *Experimentos en Astronomía*, Ed. Alhambra Longman, Madrid, 1993.
- Dale, A.O., Carrol,B.W, “*Modern Stellar Astrophysics*”, Addison-Wesley Publ. Comp., EUA, 1996.
- Moreno, R, *Experimentos para todas las edades*, Ed. Rialp. Madrid, 2008.
- Pasachoff, J.M, *Astronomy: From the Earth to the Universe*, 4th Edition, Saunders College Publishing, EUA, 1995.
- Rybicki,G.B., Lightman, A.P, *Radiative Processes in Astrophysics*, John Wiley & Sons, EUA, 1979
- Zeilik, M., Gregory, S.A., Smith, E.V.P, *Introductory Astronomy and Astrophysics*, 3rd Ed., Saunders College Publishing, EUA, 1992.