



***VIDA I MORT D'UN ESTEL***

# Índex:

<b>1</b>	<b>Introducció.</b>	<b>Pàg. 3</b>
<b>2</b>	<b>Què és un estel?</b>	<b>Pàg. 6</b>
<b>3</b>	<b>Física d'un estel.</b>	<b>Pàg. 10</b>
	<i>3.1 – Esfera de gas. Plasma.</i>	
	<i>3.2 – Força de gravetat. Llei de la gravitació universal.</i>	
	<i>3.3 – Pressió.</i>	
	<i>3.4 – Equilibri hidrostàtic.</i>	
	<i>3.5 – Reaccions de fusió.</i>	
	<i>3.6 – Emissió d'energia.</i>	
	<i>3.7 – Espectre electromagnètic. Espectroscòpia.</i>	
	<i>3.7.1 – Origen de l'espectroscòpia</i>	
	<i>3.7.2 – Espectre electromagnètic.</i>	
	<i>3.7.3 – Espectroscopi.</i>	

<b>4</b>	<b>Classificació dels estels.</b>	<b>Pàg. 22</b>
	<i>4.1 – Segons magnituds.</i>	
	<i>4.2 – Segons tipus espectrals.</i>	
	<i>4.3 – Segons lluminositat.</i>	
<b>5</b>	<b>Vida i mort d'un estel.</b>	<b>Pàg. 28</b>
	<i>5.1 – Formació d'un estel.</i>	
	<i>5.2 – Seqüència principal. Diagrama HR.</i>	
<b>6</b>	<b>Agrupacions i tipus d'estels.</b>	<b>Pàg. 42</b>
	<i>6.1 – Constel·lacions.</i>	
	<i>6.2 – Estels variables.</i>	
	<i>6.3 – Estels múltiples.</i>	
	<i>6.4 – Centres de masses.</i>	
	<i>6.5 – Cúmuls oberts.</i>	
	<i>6.6 – Cúmuls globulars.</i>	
<b>7</b>	<b>Conclusions.</b>	<b>Pàg. 51</b>
<b>8</b>	<b>Agraïments.</b>	<b>Pàg. 54</b>
<b>9</b>	<b>Bibliografia.</b>	<b>Pàg. 56</b>

# *Introducció*

L'ésser humà s'ha caracteritzat al llarg dels temps per la seva innata curiositat. Aquesta curiositat és la que ha causat el sorgiment de preguntes de tot tipus que han permès a la humanitat evolucionar en un terreny intel·lectual, cultural i científic. Algunes d'aquestes preguntes són tan actuals ara per a una gran part de la societat com ho eren en l'antiguitat; un exemple d'aquest tipus de pregunta són les qüestions que tenen a veure amb l'astronomia: per què hi ha punts que brillen al cel (estrelles)? Per què el Sol és com és (groc, ens encalenteix, ens crema, ens proporciona llum...)? Per què hi ha estrelles de colors diferents? Per què hi ha fenòmens que només veim unes poques vegades en la nostra vida (asteroides, cometes, eclipses...)?... Dos dels principals problemes que se'ns plantegen són: com respondre les preguntes una vegada formulades, ja que al llarg dels anys, la ciència s'ha allunyat a poc a poc de la societat fins a ser considerada un tema exclusiu per a científics preparats i experts en la matèria, fet que ha ocasionat que preguntes com les anteriorment mencionades hagin estat qualificades com a irresolubles per a la major part de la societat, que no és considerada científica; i la gran diferència existent entre temps humà i temps estel·lar: una persona al llarg de tota la seva vida només podrà observar un període d'una estrella comparable amb el temps que un tarda en sortir de casa i arribar a la feina.

L'objectiu d'aquest projecte d'investigació és demostrar que respondre aquestes preguntes i explicar les qüestions que sorgeixen a partir d'elles no és una tasca exclusiva per a científics, sinó que qualsevol persona amb una mica de curiositat i voluntat de saber pot aconseguir un coneixement, com a mínim general, de qüestions que a primera ullada pareixen lluny del nostre abast.

Amb aquest projecte pretenem explicar les qüestions teòriques que ens fan possible un millor estudi dels estels i fer un recorregut per la vida d'aquests: des que neixen fins a la seva mort.

*Què és un estel?*

Un estel és un cúmul de matèria en estat de plasma que en el seu interior produeix energia que és irradiada a l'espai en totes direccions. Els estels estan formats per un 75% d'Hidrogen, un 23% d'Heli i un 2% d'elements més pesats. La transformació gradual de l'hidrogen en heli dóna lloc a l'energia que després observem com la llum de l'estrella.

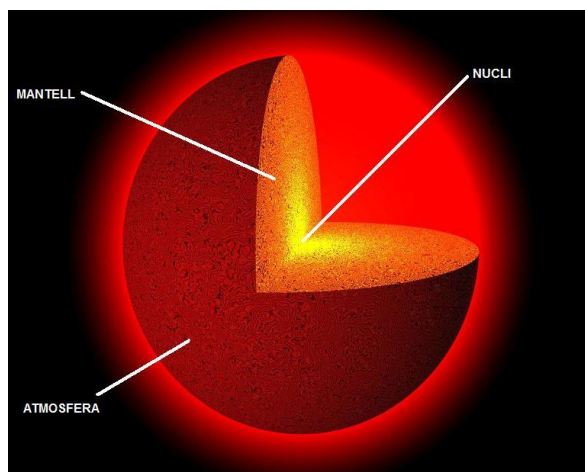
A l'univers podem trobar estels de diferents mides: els estels grans són els més brillants, però els petits viuen més temps que els grans perquè, al produir poca energia, consumeixen pocs recursos.

Hiparco (161-126 aC.) va classificar les estrelles en 6 magnituds segons quant brillen. Aquest sistema es manté actualment, però amb algunes actualitzacions.

Un estel es divideix en tres capes:

- Nucli: és on es produeixen les reaccions nuclears que generen l'energia.
- Mantell: transporta l'energia cap a la superfície i segons com la transporta, per radiació o per convecció, es divideix en dues zones: zona radiant i zona convectiva.
- Atmosfera: és la part visible i on es produeixen els fenòmens d'ejecció de matèria. L'atmosfera també es divideix en 3 capes: cromosfera, fotosfera i corona solar; i és la zona més freda dels estels, on s'hi produeixen els fenòmens d'ejecció de matèria.





Al llarg del seu cicle les estrelles experimenten canvis en la grandària de les capes i fins i tot en l'ordre en què es disposen. En algunes la zona radiant se situa abans que la convectiva i en altres a l'inrevés, depenent tant de la massa com de la fase de fusió en què es trobi. De la mateixa manera, el nucli també pot modificar les seves característiques i la seva grandària al llarg de l'evolució de l'estel.

Els astrònoms calculen la temperatura de les estrelles segons el color que tenen. Les blaves són més calentes que les grogues, i les grogues són més calentes que les vermelles.

Després de molts estudis, entre els que cal destacar els de la nord-americana Annie J. Cannon de l'observatori de Harvard a Boston, s'ha establert la següent classificació de les estrelles segons el seu espectre:

- Color blau que vol dir més o menys 30.000 °C.
- Color blanc-blau que vol dir més o menys 20.000 °C.
- Color blanc que vol dir més o menys 10.000 °C.
- Color blanc-groc que vol dir més o menys 7.000 °C.
- Color groc que vol dir més o menys 5.500 °C com el Sol.

- Color taronja que vol dir més o menys 4.000 °C.
- Color vermell que vol dir més o menys 3.000 °C.

# *Física d'un estel*

### 3.1.- Esfera de gas. Plasma.

Un estel és un cúmul de matèria en estat de plasma. El plasma és el quart estat de la matèria , és un fluid format per electrons i ions positius, la qual cosa fa que sigui conductor elèctric i que respongui fortament als camps electromagnètics. Alguns exemples de plasma són els llamps, les flames, l'aurora boreal...



### 3.2.- Força de gravetat. Llei de la gravitació universal.

Els estels, com a conseqüència de ser cúmuls de matèria i, per tant, tenir massa, exerceixen una força gravitatòria que és especialment considerable a causa de les seves grandàries i també perquè aquesta força gravitatòria és un factor fonamental en la seva formació i evolució i en l'equilibri hidrostàtic que presenten al llarg de la seva vida.

La llei de la gravitació universal (LGU) és una llei plantejada per Newton que diu que la força d'atracció entre dos cossos és directament proporcional al producte de les masses i inversament proporcional al quadrat de la distància entre ells. Això s'expressa amb l'equació:

$$F = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

On  $G$  és la constant de gravitació universal ( $6,67384 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{Kg}^2$ ) i  $F$  és el mòdul de la força entre els dos cossos.

### **3.3.- Pressió.**

La pressió (símbol  $P$ ) és la magnitud física que mesura la força per unitat de superfície, aplicada en direcció perpendicular a aquesta. La seva unitat en el SI és el Pascal, que equival a una força d'1 Newton que actua uniformement sobre 1 metre quadrat; de totes maneres, encara es fan servir altres unitats, considerades ja obsoletes, com el mil·límetre de mercuri, el bar o l'atmosfera.

### 3.4.- Equilibri hidrostàtic.

L'equilibri hidrostàtic és l'equilibri que existeix entre la força de gravetat d'un estel i la pressió que actua en sentit contrari. Un estel es manté en equilibri gràcies a l'equilibri hidrostàtic, que és el fenomen que evita que la matèria d'un estel es concentri tota en una sola capa, que l'estel es col·lapsi o que s'expandeixi.

### 3.5.- Reaccions de fusió.

La fusió nuclear consisteix en una reacció en la qual dos nuclis atòmics es converteixen en un nucli més pesat, aquesta reacció va acompanyada de l'emissió de partícules. Aquestes reaccions poden produir una gran emissió d'energia, en forma de raigs gamma.

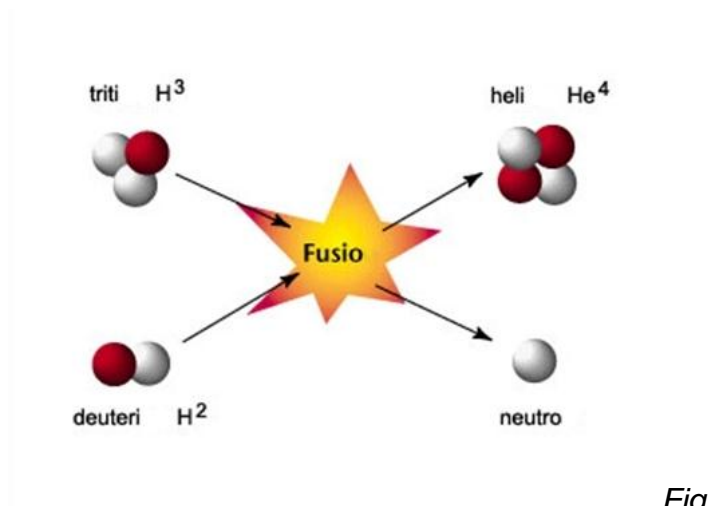


Fig. 1

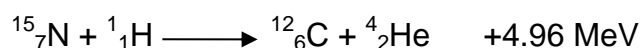
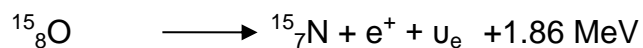
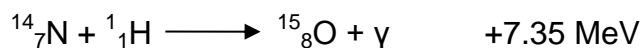
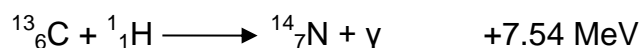
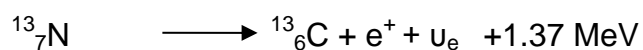
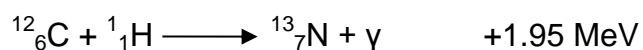
La reacció que s'observa a la Fig. 1 és la reacció de fusió més lògica, però no la més freqüent dins una estrella.

En les estrelles trobam dues maneres predominants de fusió: la cadena protó-protó i el cicle CNO o del carboni:

- Cadena protó-protó: es dona a estrelles petites (ex.: Sol) i consisteix en obtenir un àtom d'Heli a partir de quatre d'Hidrogen.

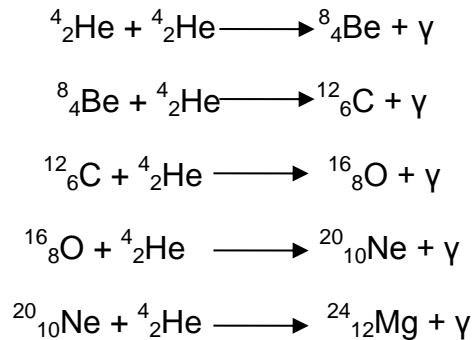


- Cicle CNO: és la font d'energia en les estrelles més massives (té lloc quan es superen els 15.000.000 K). El resultat d'aquest cicle és la fusió de quatre protons en una partícula alfa, dos positrons i dos neutrins, alliberant energia en forma de raigs gamma.



A més d'aquestes dues reaccions, cal tenir en compte una tercera reacció anomenada Procés Triple Alfa, on les partícules anomenades alfa són nuclis

d'Heli i s'obtenen elements pesants: Be, C, O, Ne i Mg. És un procés que només es dona en estrelles grans.



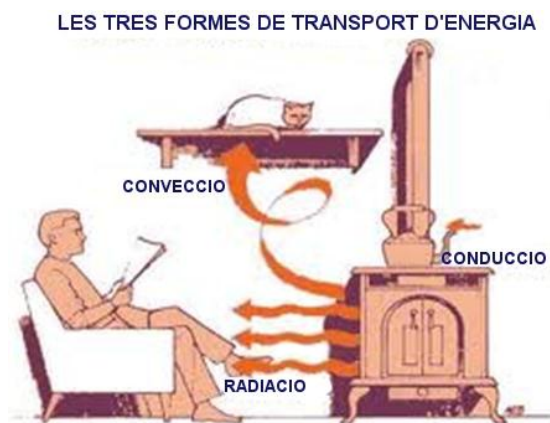
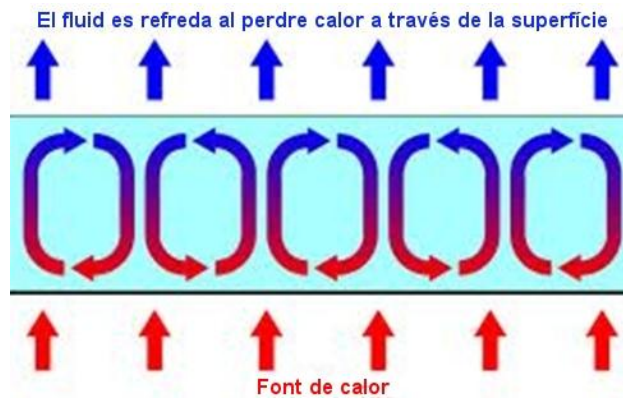
### 3.6.- Emissió d'energia.

Els estels emeten energia des del seu nucli fins a l'exterior en forma de llum i/o calor. Aquesta energia es produeix al nucli a conseqüència de les reaccions que hi esdevenen i pot ser emesa de dues maneres:

- Per convecció: es produeix a través del desplaçament de matèria entre regions amb diferents temperatures, es produeix únicament en materials fluids. Quan s'escalfen disminueix la seva densitat i ascendeixen al ser desplaçats per les porcions a menor temperatura que, al mateix temps, descendeixen i s'escalfen repetint el cicle. El resultat és el transport de calor per mitjà de les parcel·les de fluid ascendent i descendent.
- Per radiació: emissió d'energia a l'espai en forma d'ones. Tot cos amb temperatura irradia energia en forma de radiació en un determinat



“color”, de manera que podem associar cada color (espectre) a una temperatura, fet que es coneix com Emissió de Cos Negre.

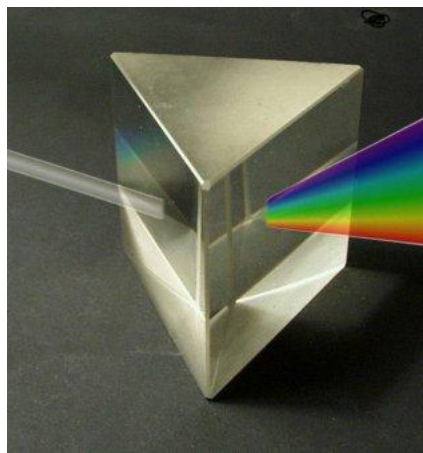


### 3.7.- Espectre electromagnètic. Espectroscòpia

#### 3.7.1.- Origen de l'espectroscòpia:

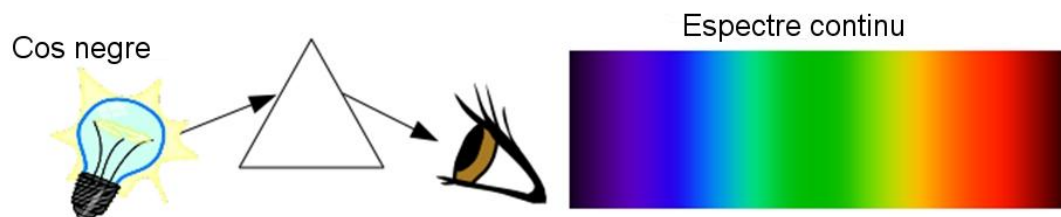
La llum visible és físicament idèntica a totes les radiacions electromagnètiques i és visible ja que els nostres ulls detecten la banda de radiació de l'espectre electromagnètic.

Des de l'antiguitat, científics i filòsofs han investigat sobre la naturalesa de la llum, però la nostra comprensió actual d'aquest fenomen físic té els seus orígens en l'experiment del prisma de Isaac Newton, amb el qual va comprovar que qualsevol feix incident de llum blanca en el prisma es descompon en els colors de l'espectre (del vermell al violeta) i més tard va comprovar que cada color corresponia a un únic interval de freqüències o longituds d'ona.



En els segles XVIII i XIX, el prisma usat per a descompondre la llum es va reforçar amb escletxes i lents telescòpiques que el convertien en un espectroscopi molt més potent i precís per examinar la llum visible. Joseph Von Fraunhofer va utilitzar aquest espectroscopi inicial per descobrir que l'espectre solar es trobava dividit per una sèrie de línies obscures, cada una amb una longitud d'ona determinada; mentre que l'espectre de la llum generada a un laboratori mitjançant l'escalfament de gasos, metalls i sals mostrava una sèrie d'estretes línies de colors damunt un fons obscur, la longitud d'ona de les quals era diferent per a cada línia i era característica de l'element químic que havia estat escalfat. A partir d'aquest moment van començar a utilitzar-se els espectres com a empremtes dels objectes i elements observats.

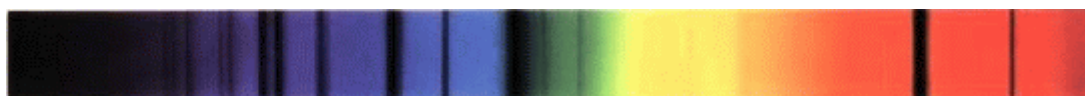
També es va descobrir que si s'escalfava suficientment un element (fins arribar a ser incandescent) produïa una llum blanca continua amb un espectre complet de tots els colors: sense línies de color sobre un fons obscur, ni línies obscures sobre els colors de l'espectre. Al poc temps es va descobrir que si aquesta llum es passava per una fina pel·lícula d'un element químic a una temperatura menor, l'espectre resultant presentava línies obscures idèntiques a les de l'espectre solar i en la mateixa freqüència on l'element químic en qüestió produïa les línies quan s'escalfava. Això va conduir a la conclusió que cada element emet i absorbeix llum a freqüències fixes i característiques.



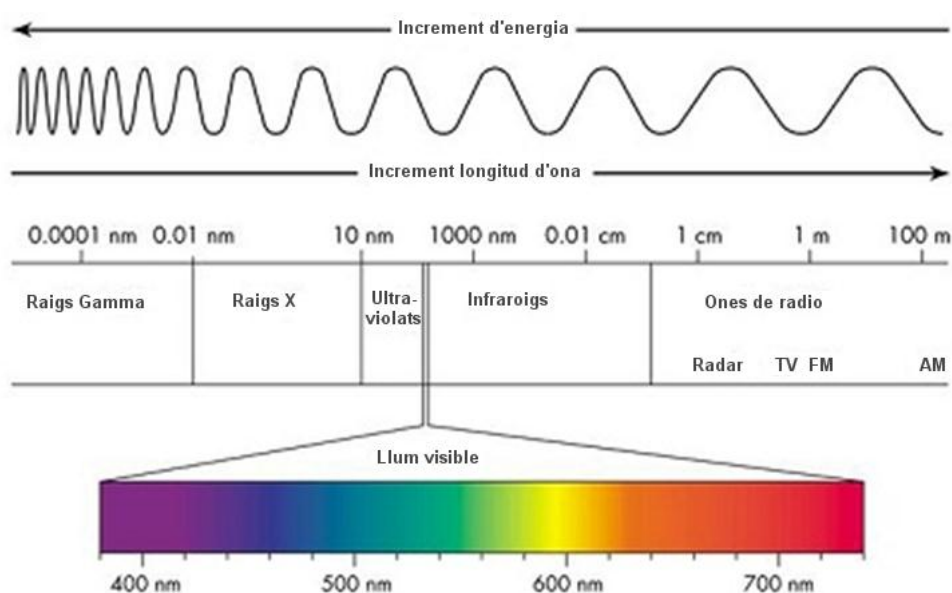
Les línies obscures de Fraunhofer que apareixien en l'espectre solar són el resultat de l'absorció de freqüències característiques dels elements químics presents en les capes exteriors de l'estel. El 1878, es van detectar unes línies a l'espectre solar que no casaven amb les de cap element conegut: eren les línies de l'Heli. El 1895 es va descobrir l'Heli terrestre.

L'espectroscòpia va demostrar que existeixen a l'univers els mateixos elements químics que a la Terra.

### 3.7.2- L'espectre electromagnètic.



S'anomena espectre electromagnètic la distribució energètica del conjunt de les ones electromagnètiques. En referència a un objecte, anomenam espectre a la radiació electromagnètica que emet o absorbeix una substància. Aquesta radiació serveix per identificar la substància de manera similar a una empremta.

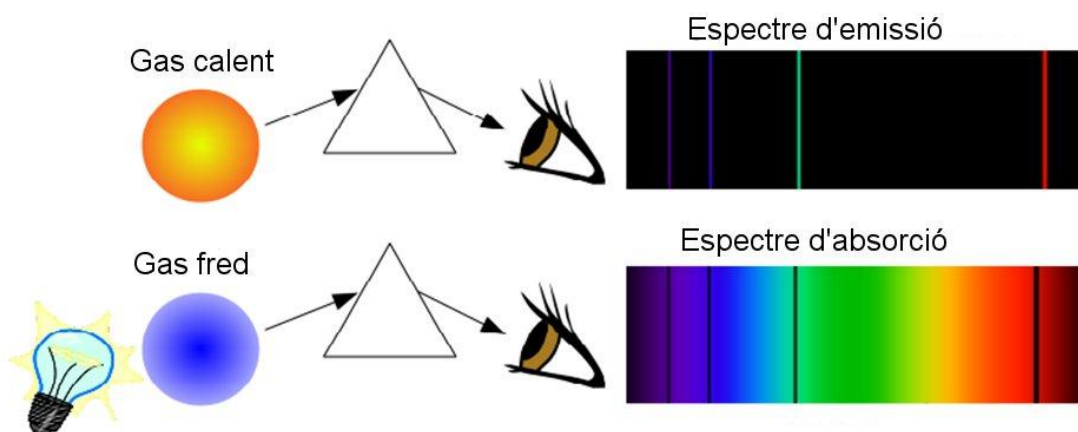


Cal dir que podem trobar dos tipus d'espectres, espectre d'emissió i espectre d'absorció, ja que cada àtom és capaç d'emetre o absorbir radiació electromagnètica en una freqüència concreta per a cada element:

- Espectre d'emissió: mitjançant un subministrament d'energia calorífica, s'estimula un determinat element en estat gasós, els seus àtoms emeten

radiació en unes freqüències concretes de l'espectre visible que constitueixen el seu espectre d'emissió. Per tant, cada element químic té el seu propi espectre d'emissió.

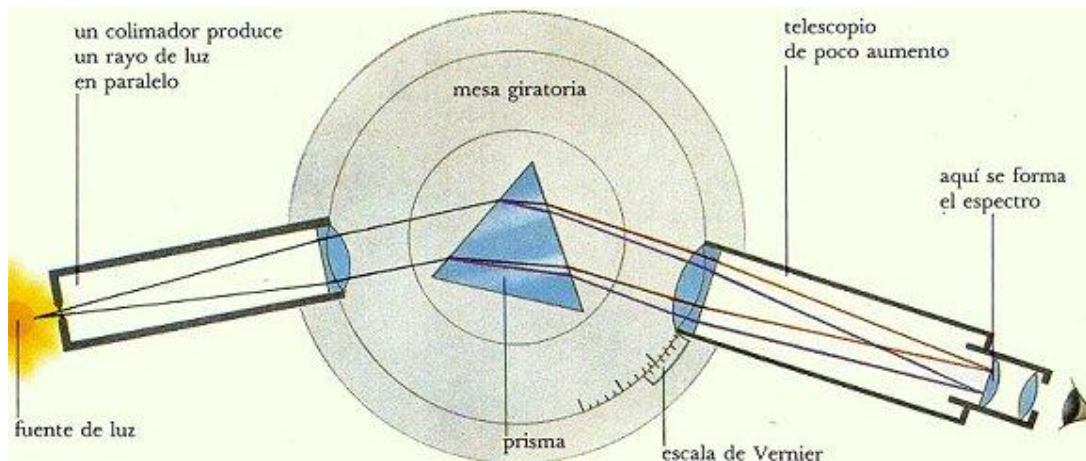
- Espectre d'absorció: es presenta quan un sòlid incandescent es troba envoltat per un gas més fred, l'espectre resultant mostra un fons ple de franges anomenades línies d'absorció, ja que el gas ha absorbit de la llum aquells colors que ell mateix irradia. Cada element químic té el seu propi espectre d'absorció, i aquest es correspon al seu espectre d'emissió.



Els espectres poden observar-se mitjançant espectroscopis (espectroscòpia) que a més d'analitzar l'espectre, ens permeten analitzar la seva longitud d'ona, la freqüència o la intensitat de radiació.

### 3.7.3.- Espectroscopi:

Un espectroscopi és un aparell que serveix per a mesurar les propietats de la llum en una determinada zona de l'espectre electromagnètic.



Encara que els espectròmetres més coneguts i rigorosos siguin el que funcionen com descriu la imatge, cal destacar que es poden “fabricar” espectròmetres casolans amb bolígrafs i discs:





# *Classificació dels estels*

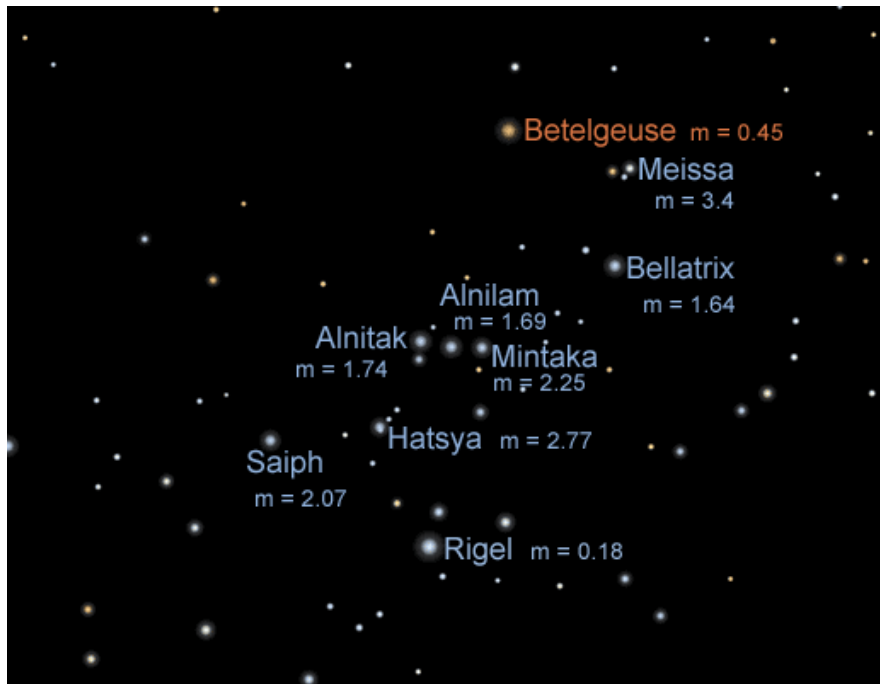
En l'actualitat trobam diferents maneres de classificar els estels: segons magnituds, segons tipus espectrals i segons lluminositat.

## **4.1 - Segons magnituds:**

Aquest sistema de classificació prové originalment de l'astrònom grec Hiparco, qui en l'any 134 aC. va classificar les estrelles en sis magnituds segons la seva brillantor. Hiparco va assignar la magnitud 1 a les 20 estrelles més brillants del firmament i anà assignant valors majors a estrelles cada vegada més dèbils fins a assignar la magnitud 6 a estrelles que ja no eren visibles a primer cop d'ull. Aquest esquema va ser adoptat posteriorment per l'astrònom egipci Ptolemeo y transmès en la tradició astronòmica occidental.

Actualment , la classificació per magnituds aparents és complementària als dos grans tipus de classificació: segons tipus espectrals i segons lluminositat.

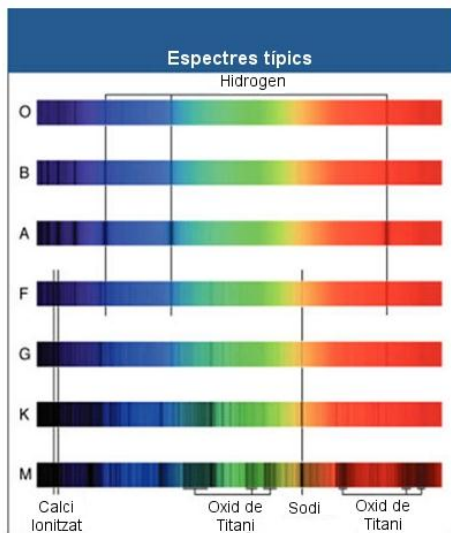




*Diferència de magnituds.*

## 4.2 - Segons tipus espectrals:

Coneguda també com Classificació espectral de Harvard, ja que va esbossar-la Edward Charles Pickering de la universitat de Harvard en l'any 1890, y que va perfeccionar Annie Jump Cannon de la mateixa universitat el 1901. Aquesta classificació és la més utilitzada en astronomia.



Tipus espectral	Exemple	Rang de temperatures	Característiques línies d'absorció	Lluentor Long. d'ona (color)
<b>O</b>	Estels del Cinturó d'Orió	>30000 K	Línies ionitzades d'heli, Línies dèbil d'hidrogen	<97nm (ultraviolat)*
<b>B</b>	Rigel	30000 K - 10000 K	Línies neutres d'heli, moderades d'hidrogen	97-290nm (ultraviolat)*
<b>A</b>	Sirio	10000 K - 7500 K	Línies molt fortes d'hidrogen	290-390nm (violat)*
<b>F</b>	Polar	7500 K - 6000 K	Línies moderades d'hidrogen, moderades de calci ionitzades	390-480nm (blau)*
<b>G</b>	Sol, Alpha Centauri A	6000 K - 5000 K	Línies dèbils d'hidrogen i fortes de calci ionitzat	480-580nm (grog)
<b>K</b>	Arcturus	5000k - 3500 K	Línies singulars i neutrals de metalls ionitzats i algunes molècules	580-830nm (vermell)
<b>M</b>	Betelgeuse Proxima centauri	<3500 K	Línies de molècules fortes	>830nm (infraroigs)

\*Totes els estels per damunt dels 6000K aparenten ésser més o manco blanques al ull humà degut a que emeteixen en totes les longituds d'ona del visible

### 4.3 - Segons lluminositat:

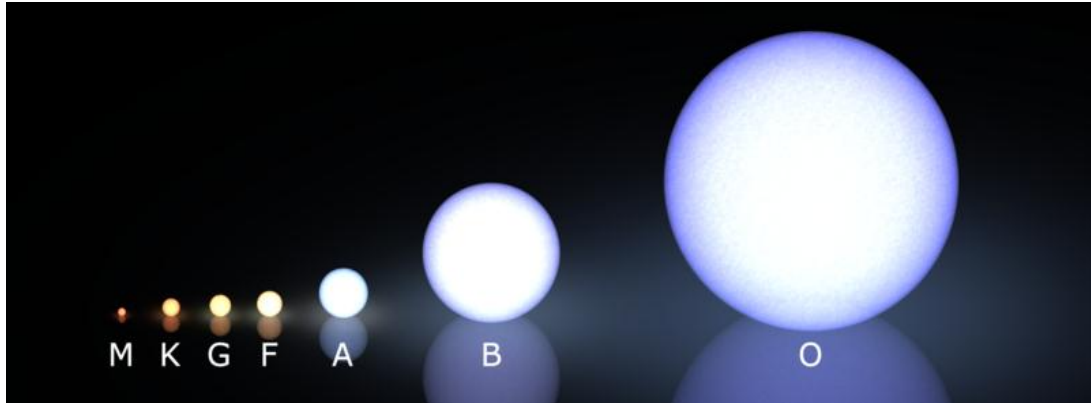
En la dècada de 1940 s'inicià un nou projecte de classificació complementària a l'Observatori Yerkes. Es tractava d'una classificació basada en les línies espectrals sensibles a la gravetat estel·lar i va ser introduïda en l'any 1943 per William W. Morgan, Phillip C, Keenan i Edith Kellman, per la qual cosa també es coneix aquesta classificació com Classificació MKK.

Al utilitzar-se línies espectrals sensibles a la gravetat de la superfície s'obté informació sobre la densitat de les estrelles. Com que el radi d'una estrella gegant és molt superior al d'una nana blanca de la mateixa massa, la gravetat es molt diferent manifestant-se en la intensitat y en la forma de les línies espectrals. Aquesta classificació complementa a la classificació segons tipus espectrals.


De la mateixa manera l'Observatori Yerkes va proposar una subdivisió de la classificació de Harvard utilitzant subíndexs, per exemple de la A1 a la A9. D'aquesta manera i utilitzant tots dos sistemes de classificació es possible afinar en el tipus espectral. Es distingeixen els següents tipus de lluminositat:

<b>Classe</b>	<b>Descripció</b>
0	Hipergegants
Ia	Supergegants molt lluminoses
Ib	Supergegants de menor brillantor
II	Gegants lluminoses
III	Gegants
IV	Subgegants
V	Estrelles nanes de la Seqüència Principal
VI	Subnanes

VII	Nanes blanques
-----	----------------



*Classificació espectral i segons lluminositat.*



*Vida i mort  
d'un estel*

## 5.1.- Formació d'un estel.

### 5.1.1.- Inicis a la nebulosa.

A primer cop d'ull l'univers ens pareix tan immens com buit: tot es obscur llevat de casuals punts brillants disposats de manera aleatòria entre la obscuritat. En efecte, això és cert: l'univers és pràcticament buit, però encara així trobam en aquest buit immenses acumulacions de gas que anomenam nebuloses. El nom nebulosa prové del llatí *nebula* que significa “boira”, però que Virgili i Horaci usaren com a “nigul”.

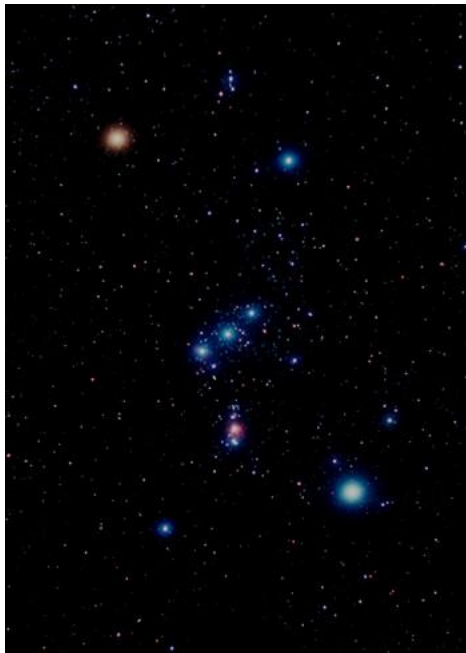


Fig.1



Fig. 2

La nebulosa d'Orió és un perfecte exemple de la presencia de nebuloses a espai que creiem buit. En aquestes dues imatges podem apreciar la diferència entre el que els nostres ulls veuen amb un telescopi de nit (Fig. 1), un conjunt

de punts brillants, i el que en realitat hi ha a l'espai (Fig. 2), una enorme nebulosa.

L'origen dels estels el trobam en aquestes nebuloses (acumulacions de gas en l'espai), on trobam punts amb major densitat que altres en els quals es col·lapsa gas i, quan la gravetat es prou forta, s'inicien les reaccions de fusió pertinents.

Per a que una nebulosa comenci a col·lapsar és necessari que es pertorbi suficientment (pertorbació generalment produïda per l'ona de xoc d'una supernova) per a induir el triomf de la gravetat sobre la pressió, però existeix un límit mínim de massa necessari, per a que una porció d'una nebulosa col·lapsi enfront d'una pertorbació, que s'anomena massa de Jeans; per tant, qualsevol porció de nebulosa que presenti una massa major o igual a la massa de Jeans reaccionarà enfront de la pertorbació i col·lapsarà, mentre que les porcions de massa menor col·lapsaran en un principi, però finalment la pressió superarà la gravetat, el col·lapse s'aturarà i la porció de gas s'expandirà de nou.

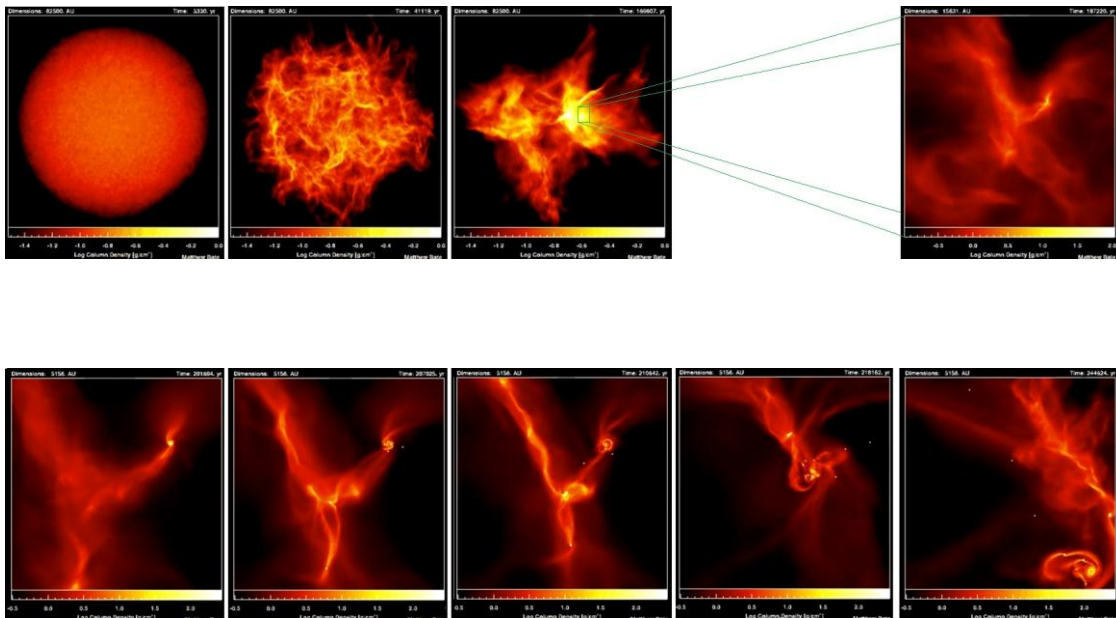
No qualsevol porció de nebulosa pot col·lapsar, només aquelles que siguin suficientment grans, ja que a major temperatura, major tendència a expandir-se, per tant és necessària més massa per a vèncer la pressió. D'altra banda, quant més densa sigui la nebulosa, menor és la massa de Jeans i, per tant, en una nebulosa densa petites zones arribaran al col·lapse amb facilitat.

A partir d'aquest col·lapse inicial a la nebulosa, el procés de formació de les estrelles es pot dividir en tres grans fases:

- 1- Col·lapse isotèrmic: en aquesta primera etapa el nívol col·lapsa sense escalfar-se i el que en un principi era una "bombolla" de gas es

fragmenta en “grums” més petits que col·lapsen també individualment. Cada grum es convertirà, posteriorment, en una estrella.

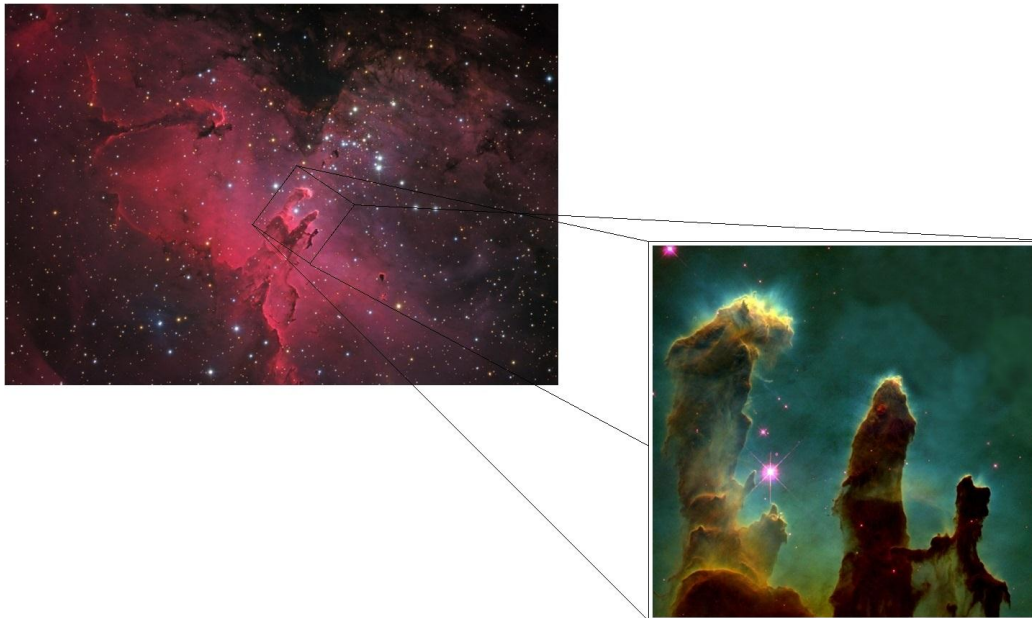
- 2- Col·lapse adiabàtic: quan la densitat ha crescut suficient, el nígul no permet la sortida de l’energia produïda pel col·lapse, la calor es queda atrapada dins el nígul i, si escapa, ho fa a un ritme molt lent. Com que la temperatura ha augmentat, la massa de Jeans augmenta també, per tant ja no hi ha més grums que col·lapsin. En aquest punt ja podem parlar de viviers d’estrelles.
- 3- Col·lapse d’un fragment: en aquesta tercera etapa, cada petit fragment té una densitat considerable i la pressió ja competeix amb la gravetat. Quan aquests fragments han arribat a aquesta mena d’equilibri hidrostàtic ja parlem de protoestrelles.



*Evolució d’una protoestrella.*



En aquestes imatges podem observar una simulació sobre una acumulació de gas (nebulosa) que es va comprimint i formant punts de major densitat que són futures estrelles.



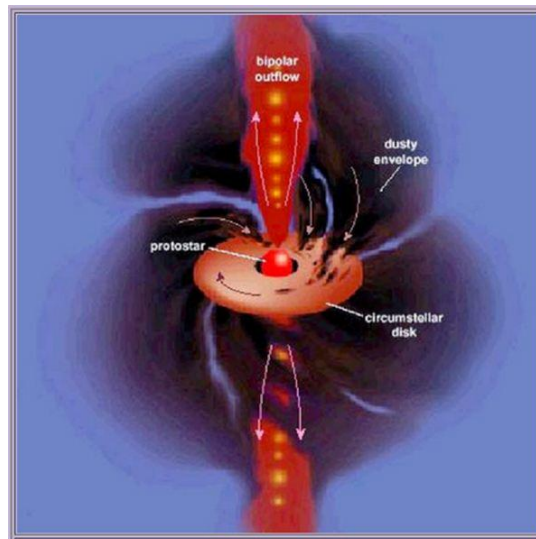
*Nebulosa de l'Àguila.*

En aquestes dues imatges tenim la nebulosa de l'ànguila vista des de distàncies diferents. A la primera (més allunyada) observam una acumulació de gas aparentment bastant densa, i a la segona (molt més a prop) observam que dins aquesta nebulosa hi ha zones del gas on ja s'han iniciat els processos de formació d'estrelles en els vivers d'estrelles.

#### 5.1.2.- Protoestrelles.

Una protoestrella és un sistema pràcticament independent de la nebulosa on es forma. La seva mida ronda les deu o cent vegades la del Sol i la seva temperatura és equivalent a la d'una estrella freda.

La protoestrella emet una enorme quantitat de llum, per tant, és lògic pensar que acabarà refredant-se, però es manté encesa a causa de l'energia en forma de calor que li cedeix la matèria que es precipita sobre la superfície del protoestel. A més, aquesta precipitació de massa, també provoca que la protoestrella guanyi massa.



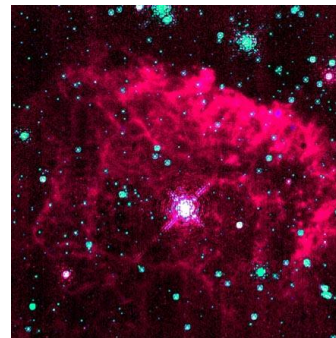
Imatge d'una protoestrella.

Cal dir que quan les protoestrelles comencen a formar-se, cadascuna genera un camp gravitatori que pot afectar a altres protoestrelles o al gas que les envolta i provocar perturbacions en ell que podrien arribar a generar noves estrelles.

### 5.1.3 - Fase preseqüència principal.

Abans que la protoestrella es classifiqui a la seqüència principal del diagrama HR sofreix una sèrie de fenòmens:

- Fusió del deuteri a causa de l'augment de la temperatura i formació d'Heli. El protoestel es manté ara gràcies a aquesta nova font d'Energia.
- Formació del disc circumestel·lar a partir de gasos i de pols de la zona de la nebulosa on s'ha format el protoestel que no han precipitat en ell. Aquest material, a causa de la rotació de la protoestrella, passa a crear una estructura aplatada i rotatòria. La importància d'aquest disc és que la pols que hi ha en ell es reuneix formant partícules sòlides de cada vegada més grans que orbiten el protoestel anomenades detrits o infinitesimals si són considerablement grans; aquests podrien reunir-se i formar un sistema planetari.
- El deuteri s'esgota i comencen les fusions d'Hidrogen. Es generen vents que "renten" l'espai circumdant deixant l'estrella en un equilibri hidrostàtic. L'estrella ha nascut i passa a la ZAMS (Zero-Age Main Sequence; Edat inicial a la seqüència principal) a partir de la qual l'estel evoluciona cap a diferents branques definides pel Diagrama HR.



*Protoestels.*

## 5.2.- Seqüència principal. Diagrama HR.

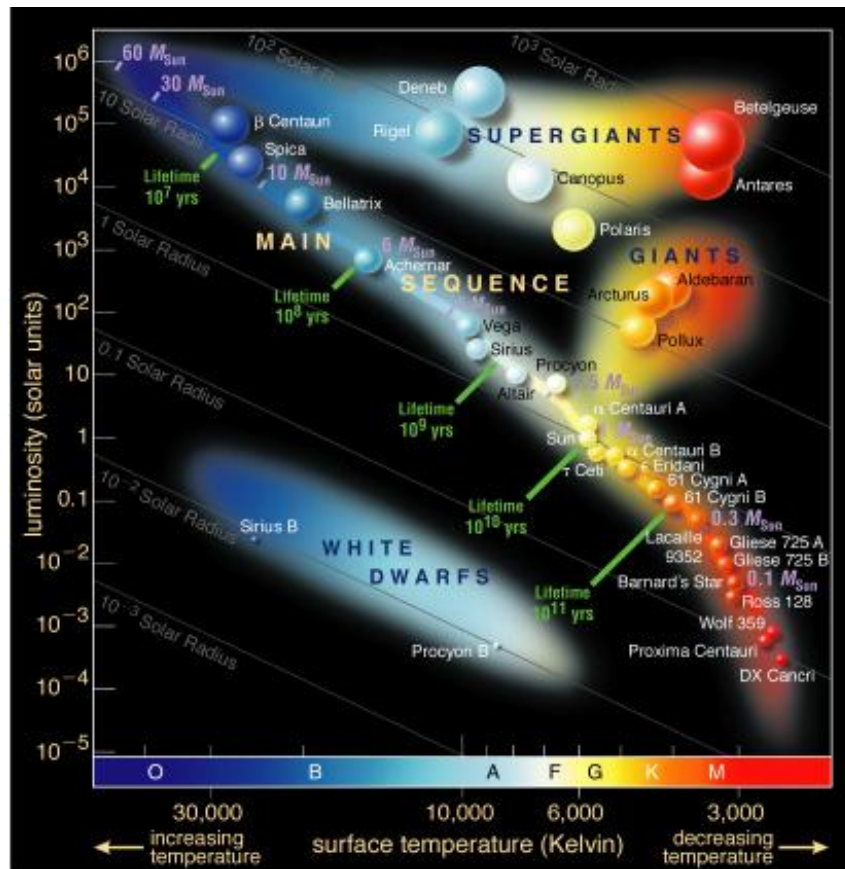


Diagrama HR.

El Diagrama Hertzsprung-Russell (Diagrama HR) mostra els resultats de diverses observacions sobre la relació entre la magnitud dels estels i la seva temperatura superficial. Va ser creat el 1911 pels astrònoms Ejnar Hertzsprung i Henry Morris Russell. El diagrama de Hertzsprung mostrava la lluminositat de les estrelles en funció del seu color, i el de Russell en funció del seu tipus espectral. El Diagrama HR s'utilitza per classificar les estrelles i per estudiar l'evolució estel·lar.

En el diagrama destaca la seqüència principal, que va des del cantó superior esquerre fins al cantó inferior dret, que conté les estrelles des de les més

calents i brillants a les més fredes i menys brillants respectivament. En aquesta seqüència principal trobam els estels que es mantenen gràcies a les reaccions de fusió que es donen en el seu nucli. Per davall de la seqüència principal trobam les nanes blanques, i per damunt les gegants vermelles i les supergegants.

Anomenam evolució estel·lar el conjunt de canvis que sofreix un estel des que neix fins que mor. La vida dels estels està determinada per les seves reaccions nuclears i les seves fases depenen d'aquestes reaccions i de com reacciona l'estel als canvis que es produeixen en ell a causa dels canvis de reaccions (canvis de temperatura i composició interna).

Una vegada els estels es troben en la seqüència principal inicien la seva evolució consumint l'Hidrogen del seu nucli fins a esgotar-lo i quedant Heli al nucli i una capa d'Hidrogen externa que pot continuar cremant ja que el nucli d'Heli es col·lapsa i comença a contreure fent que la temperatura augmenti i sigui suficient per a cremar aquest Hidrogen en capa.

- Evolució post-seqüència principal:

Hem de tenir en compte que ens trobam amb un estel que presenta el nucli d'Heli en col·lapse, combustió d'Hidrogen en capa i un embolcall d'Hidrogen i Heli. A més, en el nucli passam de considerar gas ideal a gas d'electrons degenerat, que és un gas en el qual els electrons lliures (també poden ser neutrons) es troben en l'estat de màxima densitat permesa per les lleis de la mecànica quàntica (una tona per centímetre cúbic) i és un gas capaç de subministrar la pressió suficient per a mantenir una nana blanca en equilibri (el

de neutrons manté una estrella de neutrons (púlsar)), amb el qual la conducció és més fàcil. Fins a aquest punt, el procés és el mateix per a tots els estels, però a partir d'aquí els estels evolucionen de maneres diferents depenent de la seva massa:

- Massa menor o igual a  $3m_{\odot}$ : La temperatura en el nucli és d'uns  $10^8\text{K}$  i és uniforme. Hi ha fusió d'Heli, la temperatura va augmentant i la pressió es manté constant. La fusió de l'Heli és controlada i podria durar fins que es consumís al complet si no fos perquè la temperatura augmenta fins al punt que el gas d'electrons degenerat passa a ser gas ideal, en el qual la pressió depèn de la temperatura, com a conseqüència a això es produeix una explosió, després de la qual l'estrella es refreda. Aquesta explosió s'anomena Flash d'Heli, que és una reacció nuclear de fusió descontrolada que té lloc en el nucli de les estrelles de baixa massa. Després d'aquest tenim una gegant vermella amb una elevada lluminositat i un nucli amb fusió d'Heli amb una capa d'Hidrogen. Aquesta situació és estable, però serà molt curta, ja que per a mantenir la lluminositat s'ha de cremar més material i més ràpid. Quan l'Heli s'esgota ens trobam en la mateixa situació que quan s'esgotà l'Hidrogen, ara al nucli només trobam Carboni i Oxigen i entra en col·lapse (la temperatura i la pressió augmenten). En aquesta situació tornam a passar de gas ideal a gas d'electrons degenerat, s'atura el col·lapse i tenim un nucli ric en Carboni i Oxigen i una capa d'Heli fusionant que té una temperatura major que la de ignició del Carboni i està rodejat de material inert. A partir d'aquí es creu que evolucionaran cap a nanes blanques amb un embolcall fred (nebuloses planetàries). Al ser un cos

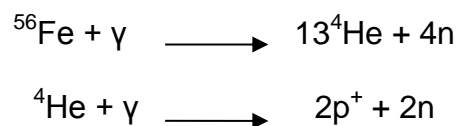
amb temperatura, presenta emissió de cos negre amb un refredament continu.



*Nana blanca amb gas expulsat al voltant.*

- Massa major o igual a  $3m_{\odot}$ : aquestes tipus d'estrelles tenen els nuclis menys densos com més massives són. La densitat i la temperatura augmentaran per contracció del nucli arribant a una temperatura d'uns  $10^8\text{K}$  essent un gas ideal. La fusió d'Heli és controlada i es formen Carboni i Oxigen al nucli. D'aquesta manera es converteixen en gegants vermelles, és a dir, s'arriba a la mateixa situació que les estrelles menors de  $3m_{\odot}$ , però sense el flash d'Heli. En aquest moments ens trobam amb col·lapse en el nucli i passam de gas ideal a gas d'electrons degenerat, la pressió del qual detén el col·lapse. Aquestes estrelles es convertiran en nanes blanques.

- Massa entre 4 i  $8m_{\odot}$ : aquest tipus d'estrelles no tenen la temperatura per el Carboni i l'Oxigen del seu nucli quan han esgotat l'Heli. Quan acaben la seva evolució no se sap molt bé si es comporten com a gegants vermelles, nanes blanques o com a supernoves.
- Massa major o igual a  $8m_{\odot}$ : aquestes estrelles tenen una elevada pressió a causa de la seva massa i es troben en estat de gas ideal, per la qual cosa la fusió del Carboni es fa de manera pacífica; es van produint altres elements fins a produir-se el Silici i tenir lloc una supernova.
- Massa major o igual a  $15m_{\odot}$ : aquestes estrelles presenten un nucli de silici que entra en col·lapse, la temperatura augmenta i el silici fusiona fins a donar lloc al Ferro. L'estrella necessita energia per crear nous elements, però arribarà un moment que per molt que augmenti la temperatura no serà suficient per reaccionar. Tindrà lloc la fotodesintegració:



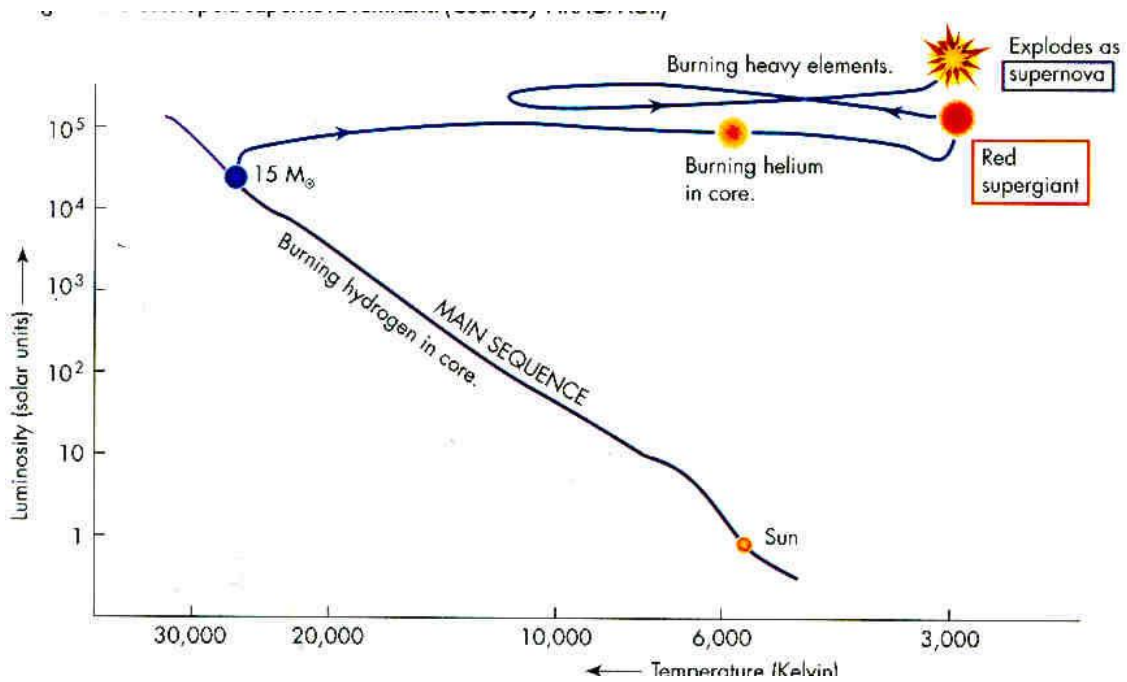
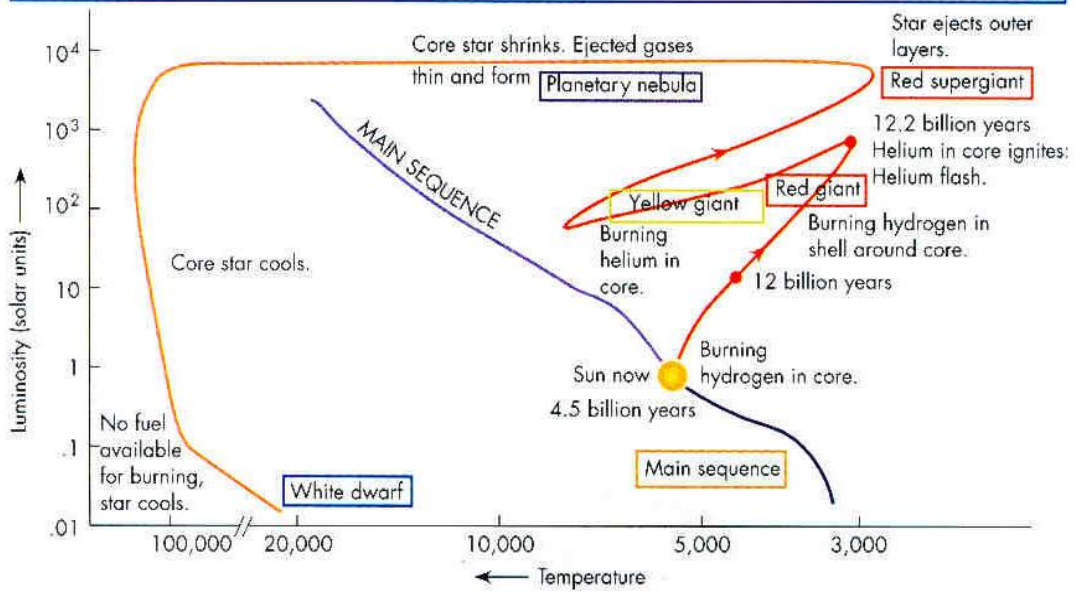
En aquest moment tenim un nucli format per protons, neutrons i electrons. Els electrons "se'n van", per tant es perd la pressió i l'estrella entra en un desequilibri superior. A aquesta densitat els neutrins poden



escapar i, per tant, es perd més energia. Al nucli només queden neutrons, ja que els protons s'han perdut amb els electrons, que passen a estar degenerats a causa que el nucli es comprimeix.

En aquesta situació, depenent de la ZAMS, les estrelles poden evolucionar de diverses maneres:

- Si la massa és menor o igual a  $25m_{\odot}$  la pressió dels neutrins és suficient per aturar el col·lapse, hi ha material que es precipita al nucli i al xocar contra la superfície provoca una ona de xoc que dóna lloc a una supernova amb estrella de neutrons.
- Si la massa és major o igual a  $25m_{\odot}$  la pressió no és suficient per aturar el col·lapse, per tant no hi ha cap força que atura la força de gravetat i es forma un forat negre.



Evolució d'un estel similar al Sol i un de 15m $\odot$ .



# *Agrupacions d'estels*

## 6.1.- Constel·lacions.

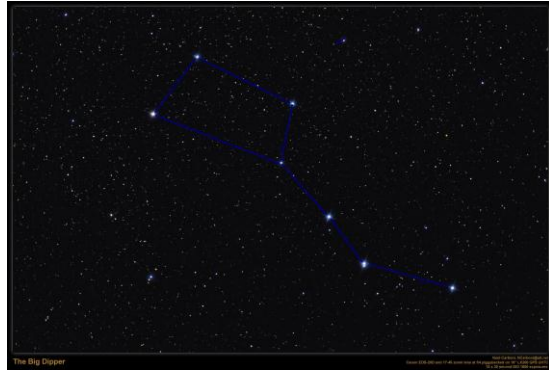
Es coneixen com a constel·lacions conjunts d'estels formant figures determinades. Aquestes agrupacions van començar a fer-se a l'antiga Grècia, on alguns "astrònoms" es dedicaren a plasmar, sobretot, figures mitològiques al firmament mitjançant la unió d'estels com a punts, d'aquesta manera ens trobam constel·lacions com Andròmeda.

Actualment, existeixen 88 constel·lacions entre les que es veuen des de l'hemisferi sud i des de l'hemisferi nord, les primeres en classificar-se van ser les de l'hemisferi nord, pel fet que és l'hemisferi observable des de Grècia, i cap al segle XVI es van classificar les de l'hemisferi sud, considerades modernes. Les representacions de les constel·lacions en l'hemisferi nord són en gran part personatges mitològics i animals, aquestes darreres són els signes del zodíac, que són les constel·lacions per les quals passa l'òrbita solar: Acuari, Aries, Càncer, Capricorn, Escorpió, Gèminis, Leo, Libra, Piscis, Sagitari, Tauro i Virgo.

Alguns dels exemples mes coneguts de constel·lacions són: Osa major, Osa menor, Casiopea..



*Casiopea*



*Osa major*

## 6.2.- Estels variables.

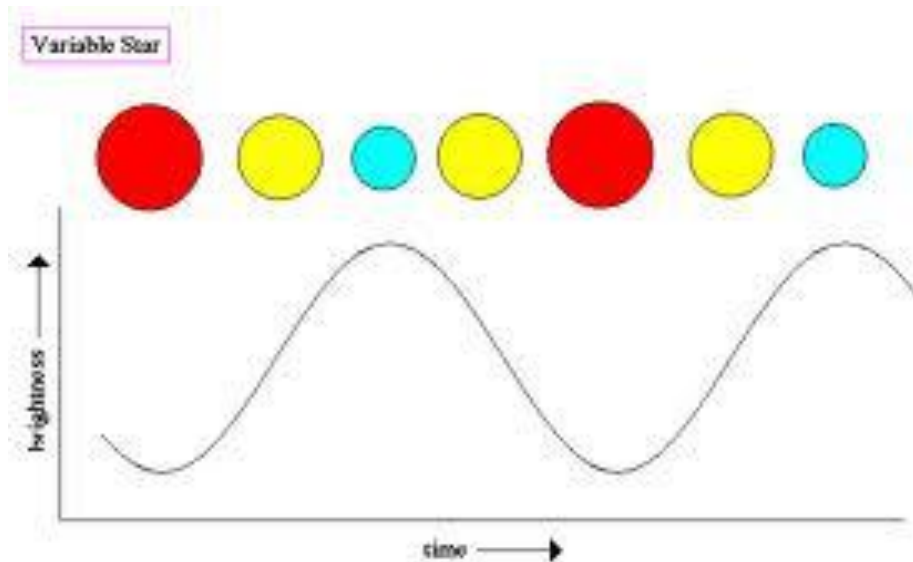
Els estels variables són estels que experimenten una variació en la seva brillantor en el transcurs del temps. La majoria dels estels tenen una lluminositat pràcticament constant (el Sol n'és un bon exemple), però trobam estels que tenen significatives variacions de lluminositat: els estels variables.



*Supergigant roja, Betelgeuse, des de 8ua*

Els estels variables poden ser de dos tipus:

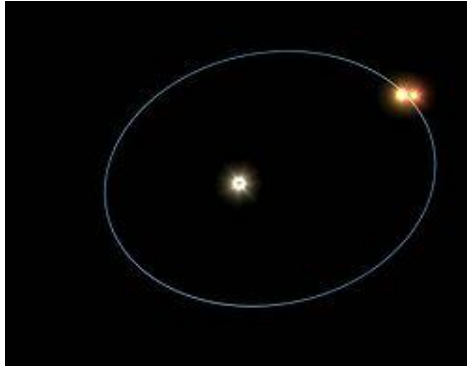
- Intrínsecs: són aquells en els quals la variabilitat es causada per canvis en les seves pròpies propietats físiques. Podem dividir aquesta categoria en tres subgrups:
  - Variables pulsants: el seu radi s'expandeix i es contrau com a part del seu procés evolutiu natural.
  - Variables eruptius: experimenten erupcions en les seves superfícies (flamerades o ejeccions de matèria).
  - Variables cataclísmics: experimenten canvis cataclísmics en les seves propietats físiques (noves i supernoves).
- Extrínsecs: són aquells en els quals la variabilitat es causada per propietats externes com la rotació o eclipses. Existeixen dos subgrups dins aquesta categoria:
  - Binaris eclipsants: aquelles en les quals un dels dos eclipsa ocasionalment a l'altre a causa de les seves translacions orbitals.
  - Variables rotants: aquelles en les quals la variabilitat és causada per algun fenomen relacionat amb la seva pròpia rotació.



*Canvis en una estrella variable.*

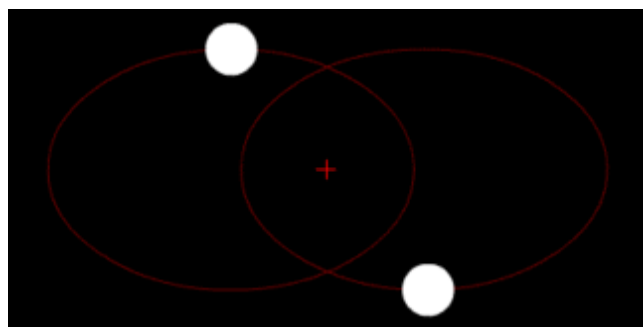
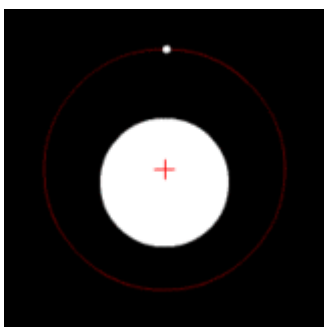
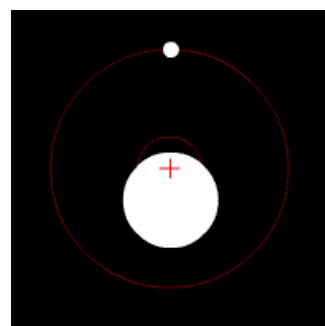
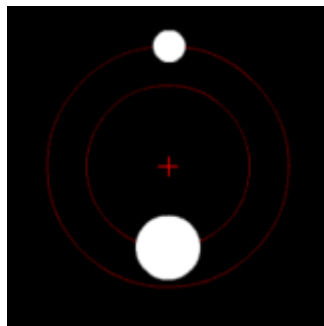
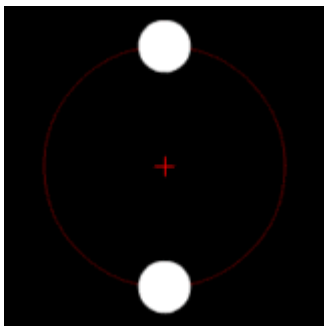
### **6.3.- Estels múltiples.**

Un estel múltiple és una agrupació de tres o més estels que semblen estar propers entre ells. Aquest fenomen pot ser només aparent (estel múltiple òptic) o estar físicament a prop (fenomen físic). Un estel múltiple físic és una mena de sistema estel·lar múltiple.



*Estel múltiple (triple)*

### 6.4.- Centres de masses.





## 6.5.- Cúmuls oberts.

Els cúmuls estel·lars oberts són grups d'estels formats a partir d'un mateix núvol molecular, sense estructura i en general asimètrics. També es denominen cúmuls galàctics.

Els estels dels cúmuls oberts es troben lligats entre si gravitacionalment, però en una menor mesura que els cúmuls globulars. Els estels que es troben en aquest tipus de cúmuls solen ser joves, massius i molt calents i el seu nombre pot oscil·lar des d'una desena fins a milers d'estels. Només s'observen cúmuls oberts en galàxies espirals i irregulars a causa de que en elles la formació estel·lar és més activa.





*Cúmuls oberts.*

## **6.6.- Cúmuls globulars.**

Un cúmulo globular és un tipus de cúmulo estel·lar que consisteix en una agrupació de  $10^5$  a  $10^6$  estels vells (a diferència dels cúmuls oberts) gravitacionalment lligats, amb una distribució aproximadament esfèrica, i que orbita en torn d'una galàxia de manera similar a la d'un satèl·lit.





*Cúmuls globulars.*

# *Conclusions*

Al llarg d'aquest projecte d'investigació hem explicat les qüestions bàsiques sobre els estels i el seu període vital aconseguint respondre les preguntes que se'ns plantejaren al començament:

- Per què hi ha punts que brillen al cel?

Aquests punts són les estrelles que es formen a partir de d'acumulacions de matèria que generalment no veim i que es troben per tot l'espai a causa de fenòmens com la densitat, la pressió, la gravetat i la temperatura.

- Per què el Sol és com és?

El Sol és un estel i, per tant, en ell es donen tots els processos físic característics dels estels: fusió, pressió, gravetat, equilibri i emissió d'energia. L'emissió d'energia causada per les reaccions de fusió del seu nucli és el que fa que escalfi i produeixi llum; i la temperatura a la que es troba degut a aquestes mateixes reaccions és el que fa que sigui groc.

- Per què hi ha estrelles de colors diferents?

La diferència de color entre els estels es deu a la seva temperatura superficial: quan són blaus significa que són calents i quan són vermells que són freds. Aquesta relació entre color i temperatura ha estat permesa per l'estudi de l'espectre electromagnètic.

- Per què hi ha fenòmens que només veim unes poques vegades en la nostra vida (asteroides, cometes, eclipses...)?

Això és una conseqüència de la enorme diferència existent entre temps estel·lar i temps humà. És a dir, una vida humana, enfront una vida estel·lar, és tot just un gra d'arena en una platja.

Per a concloure, cal dir que en un temps relativament curt (dos anys) hem aconseguit crear aquesta memòria on trobam, des d'un punt de vista general, la resposta a algunes de les preguntes que ens puguin sorgir sobre astronomia, en especial sobre l'evolució estel·lar, és a dir, des que neix una estrella com evoluciona i comença a degradar-se fins a la seva mort. També hem de dir que tota la informació necessària per realitzar aquest projecte es troba a l'abast de qualsevol persona amb la curiositat citada al principi de la memòria: internet, llibres, enciclopèdies... Per tant, queda demostrat que l'astronomia, en aquest cas, és una ciència a l'abast de tothom, no únicament de científics i experts. És a dir, que la curiositat és el gran motor del món i, sobretot, de la ciència.

# *Agraïments*

Gràcies a na M.P.T. per l'ajuda el dia de l'observació al cel de nit i haver resolt els meus dubtes sobre aspectes de fusió nuclear amb els quals em trobava entrebancada. A més, gràcies per la seva constant atenció cap a la meva feina. Gràcies a na P.A. pels ànims, per la constància, per estar sempre disposta com a tutora, professora de química i, sobretot, com a persona. Moltes gràcies per haver calmat els meus nervis.

Gràcies al Dr. Ramon Oliver pels apunts sobre evolució estel·lar.

Gràcies a Tom Field per haver-me permès emprar durant un període de temps més ampli el seu programa d'espectroscòpia (Rspec) i al qual li proporcionaré encantada una còpia d'aquest projecte com em va sol·licitar.

Gràcies a en Fran Sarciat per estar sempre disposat a resoldre els meus infinits dubtes informàtics, qualsevol dia i a qualsevol hora. Gràcies per mai queixar-se i per fer possible la presentació d'aquest projecte.

Gràcies a na M.P. per haver-nos donat la oportunitat de fer aquests projectes i, per tant, la oportunitat d'aprendre i de créixer en molts d'àmbits.

I gràcies al meu tutor, X.V., per la seva ajuda constant, per les seves explicacions, per haver transformat una feina en un gust, per no haver-ho fet avorrit i per haver-me fet aprendre tant i tant.



# *Bibliografía*

## INFORMACIO INTERNET:

De referencia:

- <http://es.m.wikipedia.org/wiki/Espectro:electromagn%C3%A9tico>
- [http://es.m.wikipedia.org/wiki/Espectroscopia#section\\_3](http://es.m.wikipedia.org/wiki/Espectroscopia#section_3)
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Equilibrio\\_hidrost%C3%A1tico](http://es.wikipedia.org/wiki/Equilibrio_hidrost%C3%A1tico)
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Ley\\_de\\_la\\_gravitaci%C3%B3n\\_universal](http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_la_gravitaci%C3%B3n_universal)
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Equilibrio\\_hidrost%C3%A1tico](http://es.wikipedia.org/wiki/Equilibrio_hidrost%C3%A1tico)
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Estrella\\_variable](http://es.wikipedia.org/wiki/Estrella_variable)
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Estrella\\_m%C3%BAltiple](http://es.wikipedia.org/wiki/Estrella_m%C3%BAltiple)
- [http://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%BAmulo\\_abierto](http://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%BAmulo_abierto)
- <http://ca.wikipedia.org/wiki/Pressi%C3%B3>
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Lista\\_de\\_constelaciones](http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Lista_de_constelaciones)
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n\\_estelar#Clasificaci.C3.B3n\\_seC3.BAn\\_magnitudes](http://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_estelar#Clasificaci.C3.B3n_seC3.BAn_magnitudes)

Informació per aprofundir:

- [www.astromia.com/universo/clasestrellas.htm](http://www.astromia.com/universo/clasestrellas.htm)
- [http://www.ecured.cu/index.php/ciclo\\_del\\_carbono\\_\(Astronom%C3%ADa\)](http://www.ecured.cu/index.php/ciclo_del_carbono_(Astronom%C3%ADa))
- [http://people.highline.edu/iglozman/classes/astronotes/media/spec\\_class.jpg](http://people.highline.edu/iglozman/classes/astronotes/media/spec_class.jpg)
- <http://zebu.uoregon.edu/~soper/Stars/hrdiagram.html>
- <http://es.scribd.com/mobile/doc/19622798?width=320>
- [http://almaak.tripod.com/temas/estrellas\\_variables.htm](http://almaak.tripod.com/temas/estrellas_variables.htm)

## INFORMACIÓ AUDIOVISUAL:

Imatges:

- [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Morgan-Keenan\\_spectral\\_classification.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Morgan-Keenan_spectral_classification.png)
- <http://www.fotosguapas.net/data/media/1/rayos2.jpg>
- [http://www.greenlandadventure.com/infopolar\\_aurora\\_boreal/aurora\\_boreal\\_1.jpg](http://www.greenlandadventure.com/infopolar_aurora_boreal/aurora_boreal_1.jpg)
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Pleiades\\_large.jpg](http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Pleiades_large.jpg)
- [http://astronomyonline.org/Stars/Images/hrdiagram\\_th.jpg](http://astronomyonline.org/Stars/Images/hrdiagram_th.jpg)
- [http://www.windows2universe.org/the\\_universe/Stars/orion\\_magnitudes\\_big.gif](http://www.windows2universe.org/the_universe/Stars/orion_magnitudes_big.gif)
- <http://articuweb.wordpress.com/2010/03/09/papercraft-el-sol-en-capas/>

Documentals:

- <http://www.youtube.com/watch?v=yXCuaRsLz4s&list=PLC786F12E000E7A1B&index=6> Stellar Evolution Science Channel
- <http://www.youtube.com/watch?v=mzE7VZMT1z8> Cycle of Stars Canal Historia
- <http://www.youtube.com/watch?v=xDJ0HcP8Keo> La evolución estelar: desde la vida hasta la muerte de las estrellas

#### LLIBRES I DOCUMENTS:

- Estrellas web small – PDF
- Stellar Evolution – PDF
- Fundamentos Astrofisica Zuluaga, parte4-final – PDF
- Viaje a través del universo – Volumen 5 – Estrellas I – Ediciones Folio
- Viaje a través del universo – Volumen 6 – Estrellas II – Ediciones Folio

#### APUNTS I TRANSMISSIÓ DE CONEIXEMENTS ORALS:

- Apunts de 4t de Carrera del Doctor Ramon Oliver del dept. física solar de la UIB.
- Resolució de dubtes amb na M<sup>a</sup> Paz Terrasa sobre aspectes de les reaccions de fusió i amb Francisco Sarciat sobre aspectes informàtics.