

LA VIDA ESTEL·LAR.

**EL NAIXEMENT I LES MORTS DE
LES ESTRELLES**

EL SEGUIMENT D'UNA SUPERNOVA



Vull agrair principalment a la tutora del meu treball, per ajudar-me, guiar-me i aconsellar-me en els moments necessaris, encara que el tema escollit no fos la seva especialitat.

En especial, agrair a l'Agrupació Astronòmica de Sabadell i el grup intern especialitzat en supernoves per oferir-me les seves instal·lacions i els seus coneixements. Gràcies a tots ells he pogut realitzar aquest treball sense cap inconvenient.

Per altre banda, i molt important, vull donar les gràcies a la meva família per comprometre's a portar-me fins a Sabadell els dies necessaris i esperar-se fins a altes hores de la nit a que acabés de realitzar les diverses observacions portades a terme.

Ja per últim, vull agrair a totes les altres persones que m'han ajudat en diversos aspectes que han aportat a aquest treball una millora.

“Allò que sabem és una gota d'aigua,
el que ignorem és l'oceà.”

Isaac Newton

1. ÍNDEX

| | |
|--|-----------|
| 1. ÍNDEX | 4 |
| 2. INTRODUCCIÓ | 6 |
| 3. ASTRONOMIA ESTEL·LAR I L'ASTROFÍSICA | 10 |
| 4. CARACTERÍSTIQUES GENERALS I CLASSIFICACIÓ DE LES ESTRELLES | 11 |
| 4.1 CARACTERÍSTIQUES GENERALS | 11 |
| 4.1.1 QUÈ SÓN LES ESTRELLES? | 11 |
| 4.1.2 EL COLOR DE LES ESTRELLES | 12 |
| 4.1.3 LA MAGNITUD DE LES ESTRELLES | 13 |
| 4.1.4 LA MASSA DE LES ESTRELLES | 15 |
| 4.1.5 LA MIDA DE LES ESTRELLES | 15 |
| 4.1.6 LA COMPOSICIÓ DE LES ESTRELLES | 16 |
| 4.2 LA CLASSIFICACIÓ DE LES ESTRELLES | 16 |
| 4.2.1 LES CLASSES ESPECTRALS I LES CLASSES DE LLUMINOSITAT | 16 |
| 4.2.2 LES CLASSES ESPECTRALS | 17 |
| 4.2.3 LES CLASSES DE LLUMINOSITAT | 17 |
| 4.3 EL DIAGRAMA DE HERTZSPRUNG-RUSSELL (HR) | 18 |
| 4.4 L'ESTRUCTURA DE LES ESTRELLES | 20 |
| 5. EL NAIXEMENT DE LES ESTRELLES | 24 |
| 5.1 EL MEDI INTERESTEL·LAR | 24 |
| 5.1.2 ELS NÚVOLS MOLECULARS | 25 |
| 5.1.3 LES REGIONS HII | 25 |
| 5.2 LA FORMACIÓ DE LES ESTRELLES | 27 |
| 5.2.1 ON ES FORMEN LES ESTRELLES? | 27 |
| 5.2.2 COL·LAPSE INICIAL | 27 |
| 5.2.3 COL·LAPSE FINAL | 29 |
| 5.2.4 EL NAIXEMENT DE L'ESTRELLA | 30 |
| 6. L'EVOLUCIÓ ESTEL·LAR | 31 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 6.1 | LA FASE MÉS LLARGA DE LA VIDA ESTEL·LAR. LA COMBUSTIÓ DE L'HIDROGEN | 31 |
| 6.2 | ESTRELLES DE MASSA BAIXA I INTERMÈDIA ($M < 9 M_{\text{SOL}}$) | 32 |
| 6.2.1 | LES ESTRELLES ENTRE 0,08 I 0,5 MASSES SOLARS | 32 |
| 6.2.2 | ESTRELLES ENTRE 0,5 I 7 MASSES SOLARS | 33 |
| 6.2.3 | ESTRELLES ENTRE 7 I 9 MASSES SOLARS | 37 |
| 6.2.4 | LES SEVES MORTS | 38 |
| 6.3 | ESTRELLES DE MASSA ELEVADA ($9 M_{\text{SOL}} < M < 30 M_{\text{SOL}}$) | 39 |
| 6.3.1 | LES SEVES MORTS | 43 |
| 6.4 | ESTRELLES MOLT MASSIVES ($30M_{\text{SOL}} < M < 100M_{\text{SOL}}$) | 46 |
| 6.4.1 | LA SEVA MORT | 46 |
| 6.5 | LES ESTRELLES DE MÉS DE 100 MASSES SOLARS | 47 |
| 6.5.1 | LA SEVA MORT | 49 |
| 7. | <u>OBSERVACIÓ DE SUPERNOVES I LA SEVA FOTOMETRIA</u> | 50 |
| 7.1 | INTRODUCCIÓ | 50 |
| 7.2 | QUÈ ES NECESSITA PER A FER UNA OBSERVACIÓ? | 52 |
| 7.2.1 | ELS TELESCOPIES | 52 |
| 7.2.2 | LES CÀMERES CCD | 55 |
| 7.3 | PLANIFICACIÓ D'UNA OBSERVACIÓ | 57 |
| 7.4 | OBSERVACIÓ | 58 |
| 7.4.1 | PREPARACIÓ DE L'OBSERVACIÓ | 58 |
| 7.4.2 | OBSERVACIÓ | 59 |
| 7.5 | PRETRACTAMENT DE LES IMATGES | 63 |
| 7.6 | FOTOMETRIA | 65 |
| 7.6.1 | OBTENCIÓ DE LA MAGNITUD DE LA SUPERNOVA | 65 |
| 7.7 | RESULTATS. CORBA DE LLUM | 69 |
| 8. | <u>CONCLUSIONS</u> | 72 |
| 9. | <u>VISIÓ PERSONAL</u> | 75 |
| 10. | <u>FONTS D'INFORMACIÓ</u> | 77 |

2. INTRODUCCIÓ

La nostra vida és una rutina que emprenem cada dia en despertar-nos, on hi apareixen les mateixes persones i transcorre en els mateixos llocs. Tenim el costum de viure durant el dia. Durant la nit, com que és fosc i no es veu res, anem a dormir. Però a mi, des de ben petita, em van ensenyar que quan es comença a fer fosc podem veure fenòmens espectaculars fent un gest tan simple com aixecar el cap. Ens adonem que no tota la vida és dins del nostre planeta, la Terra.

Va ser així com va començar la meva afició per l'astronomia. A l'escola de primària vaig començar estudiant la Lluna i les seves fases, les constel·lacions, els eclipsis, etc. Però no només ho estudiàvem, sinó que molts dies ens quedàvem a dormir al pati de l'escola i observàvem el cel.

Amb el pas dels anys aquesta afició ha anat creixent, de forma que no en tenia prou amb observar el cel i projectar dins el meu cap aquelles formes que es feien unint les estrelles com si fossin dibuixos, volia aprofundir més i entendre tot el que hi ha a l'Univers.

Pel meu cap, hi voltaven moltíssimes preguntes: Com neixen i com moren les estrelles?; Totes les que veiem estan vives, o no?; Per què n'hi ha que les veiem més blaves o més vermelles?; Hi ha vida en altres sistemes d'estrelles semblants al nostre?; Com s'observa tot el que s'ha descobert?; El nostre Univers és infinit?; etc.

Aquest treball de recerca ha estat la meva ocasió per intentar obtenir respostes a totes aquestes preguntes sobre astronomia. Al principi, no tenia del tot clar en què centrar-me, ja que és un camp molt extens i es poden estudiar milions de coses, per tant em vaig informar i vaig trobar un curs molt interessant de Supernoves a l'Agrupació Astronòmica de Sabadell durant l'estiu, que em va ajudar a escollir un camp més específic pel meu treball.

El títol del meu treball és *“La vida estel·lar. El naixement i les morts de les estrelles”*. Amb aquest títol he volgut expressar breument de què tracta el meu treball. Com bé diu, explico l'evolució de les estrelles des que neixen fins la seva mort.

En llegir aquest títol, molta gent es preguntarà el perquè del plural a l'hora d'escriure "les morts de les estrelles", en lloc del singular. Aquest plural es deu al fet que totes les estrelles neixen de la mateixa forma, però a mesura que evolucionen cada una agafa uns trets que la diferència de les altres, i això fa que totes tinguin una mort diferent depenent de les seves característiques.

Aquest títol és molt general, ja que engloba tot el contingut del treball. Tot i així, dins el treball es pot veure que m'he centrat més en una part, sobre la qual també he fet la part pràctica. Aquesta és una de les formes de morir de les estrelles: les supernoves.

Per fer-nos-en una idea, una supernova és l'explosió que experimenten unes estrelles característiques quan arriben al final de la seva vida.

L'objectiu personal d'aquest treball és, com ja he dit, respondre moltes i moltes preguntes que no només em faig jo, sinó que també se les fa molta gent a qui li interessa aquest camp. Però per encaminar-lo bé, m'he plantejat certes qüestions les quals es detallen a continuació:

- Com evolucionen les estrelles per tal de morir en forma de supernova?
- Totes les supernoves disminueixen la seva intensitat lumínica al llarg del temps?

La meva hipòtesi a aquestes qüestions ha anat variant una mica, però principalment crec que les estrelles han de evolucionar totes diferent per tal de morir unes en forma de supernova i d'altres en altres formes. Però no tinc clar com evolucionen ben bé per crear una explosió, una supernova. Pel que fa a totes les supernoves, crec que si que disminueixen la seva intensitat lumínica al llarg del temps.

Per poder respondre aquestes preguntes, em calia plantejar-me uns següents:

- Conèixer l'evolució de les estrelles, és a dir, la seva vida, per tal d'arribar a entendre millor què és una Supernova i per què succeeix aquest fenomen.
- Aprendre quines són les tècniques que utilitzen els astrònoms per obtenir tanta informació sobre els cossos celestes.

- Conèixer el funcionament dels telescopis i les càmeres amb les quals obtenen imatges. També altres instruments que funcionen amb altres tipus de llum.
- Saber el funcionament d'aquests, m'agradaria poder observar alguna supernova i poder fer-ne el seguiment.

Per complir tots aquests objectius tinc la intenció d'informar-me a través d'internet, de llibres i de persones que em puguin facilitar informació rellevant. Però com he dit abans, m'he mogut per poder participar en un curs d'astronomia que s'ha fet aquest estiu a l'Agrupació Astronòmica de Sabadell.

El curs s'anomena "Supernoves", i com bé diu el nom, tracta sobre aquest fenomen. S'ha fet a Sabadell a l'agrupació mateix durant cinc dies. Cada dia es feien quatre hores (dues de teoria, i dues més de pràctica). Aquest curs el va portar l'Albert Morral, llicenciat en astrofísica. Ell era qui ens feia les classes teòriques i algunes de les pràctiques. Les últimes pràctiques, però, especialitzades en supernoves, les va fer en Xavier Puig, un aficionat i soci de l'agrupació que cada divendres a la nit, amb un grup de gent, fa observació de supernoves.

He tingut avantatge a l'hora de fer pràctiques, ja que en Xavi em va oferir anar cada divendres a Sabadell a observar supernoves i fer el seguiment d'una d'específica. D'aquesta manera, he pogut fer la meva part pràctica del treball que consisteix en l'observació i el tractament d'imatges de supernoves, i en fer-ne fotometria.

La fotometria és una tècnica molt utilitzada pels astrònoms, la qual explicaré més detalladament en el treball.

El meu treball consta de dues parts. La primera, és una part més teòrica on explicaré unes bases físiques per després comprendre la vida de les estrelles molt detalladament.

La segona part, més pràctica, explica els mètodes que es fan servir per a fer observacions astronòmiques. També hi inclouré la part pràctica que he fet durant aquests mesos.

Finalment, doncs, aquí acabo la meva introducció, espero que el treball compleixi els objectius assignats i que tots en puguem treure el màxim profit.

3. ASTRONOMIA ESTEL·LAR I L'ASTROFÍSICA

L'astronomia estel·lar és l'estudi de les estrelles; la seva formació, evolució i final, així com les seves propietats i distribució. Aquest estudi és imprescindible per continuar avançant sobre el coneixement de l'univers, ja que elles componen els elements bàsics, com les galàxies. L'astronomia estel·lar s'ha determinat a través de l'observació i la comprensió teòrica.

Per a comprendre l'astronomia estel·lar s'ha de tenir un nivell alt en astrofísica, que és la branca de la física que estudia l'Univers i els cossos que conté. Els principals temes d'estudi de l'astrofísica són les estrelles, les galàxies¹, el medi interestel·lar, l'estructura de l'Univers i, en menor mesura, també els cossos del Sistema Solar.

L'astrofísica fa ús de gairebé totes les branques de la física per a l'estudi dels astres: l'òptica, la mecànica, l'electromagnetisme, la termodinàmica, la física quàntica, la relativitat general, la mecànica de fluids, etc. i en menor mesura també d'altres ciències com la química o la geologia.

Com tota ciència, té una part teòrica i una altra experimental, encara que en la seva vessant experimental ha de limitar-se a l'anàlisi de la llum que arriba a la Terra, que és capturada pels telescopis i processada a través de càmeres i aparells electrònics com els espectrògrafs², els fotòmetres³ o les càmeres CCD. Els astrofísics no poden dissenyar experiments com altres científics, sinó que s'han de limitar a l'anàlisi de la llum procedent de l'espai. Així doncs, com es comprovarà, la part experimental d'aquest treball no és un experiment, sinó un anàlisi de llum procedent d'uns determinats fenòmens.

Per fer un estudi astronòmic s'han de tenir unes bases físiques molt clares. Gràcies a aquestes bases, s'ha pogut descobrir tot el que es sap avui en dia sobre l'univers.

(vegeu les bases físiques a Annex 1).

¹ *Galàxia*: Conjunt d'estrelles, núvols de gas, planetes i pols còsmica units per una força de gravetat.

² *Espectrògraf*: Aparell que permet d'enregistrar sobre un suport d'imatge els resultats obtinguts.

³ *Fotòmetre*: Aparell per a mesurar la intensitat de la llum.

4. CARACTERISTIQUES GENERALS I CLASSIFICACIÓ DE LES ESTRELLES

4.1 Característiques generals

4.1.1 Què són les estrelles?

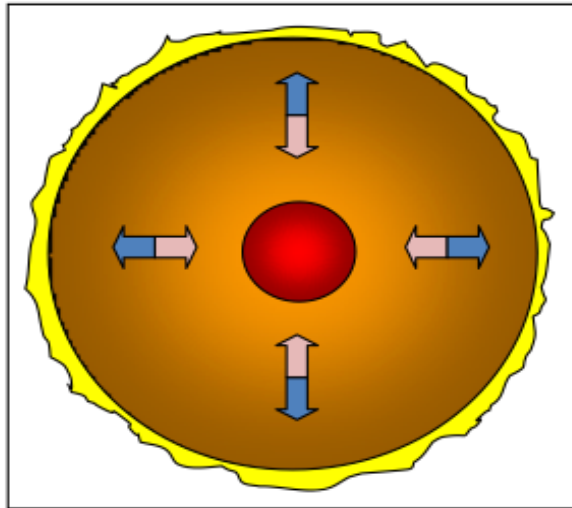
Una estrella és una gran esfera de gas molt calent que emet llum per si mateixa. Estan tan calentes perquè el gas de què estan formades s'ha comprimit per l'efecte de la força de la gravetat.

Ara bé, si una estrella hagués de brillar només a causa de la compressió i escalfament del seu gas, ho podria fer només durant uns quants milions d'anys, però no durant milers de milions d'anys com és el cas de les estrelles. Hi ha una última raó que és la causant d'aquesta enorme emissió d'energia. En el centre de l'estrella, el gas està tan comprimit que la temperatura arriba als deu milions de graus. A aquesta temperatura es comencen a tenir reaccions nuclears de fusió que produeixen energia en forma de llum i que manté l'estrella molt calenta durant tota la seva vida.

Com que hi ha aquesta font d'energia al centre de l'estrella, aquesta es troba en un equilibri gairebé perfecte, anomenat equilibri hidrostàtic. La força atractiva de la gravetat queda compensada perquè el gas calent de l'estrella exerceix una pressió cap enfora, que pot imaginar-se degut als xocs entre les partícules en continu moviment a causa de la seva temperatura. També les partícules de llum, els fotons, en sortir de l'estrella exerceixen una pressió cap a l'exterior, anomenada pressió de radiació. Aquestes partícules de llum, quan surten del nucli, ho fan en forma de raigs Gamma, però a mesura que surten es converteixen en llum visible, de forma que podem observar-les. D'aquesta manera l'estrella es troba en equilibri a causa d'aquests dos factors que s'igualen: la força de gravetat que tendeix a contraure l'estrella i les pressions, tant del gas com de la radiació, que tendeixen a expandir-la.

Figura 1. Equilibri hidrostàtic d'una estrella. Equilibri entre la força de la gravetat (fletxes roses) i la pressió del gas i de la radiació (fletxes blaves).

Font: Power Point, curs Supernoves.



4.1.2 El color de les estrelles

A primera vista, les estrelles semblen puntets de color blanc, però si es fa una fotografia d'uns minuts d'exposició⁴ ja es comença a veure els seus veritables colors: hi ha estrelles blanques, blaves, vermelles, taronges, grogues, etc. A simple vista no es distingeix el color perquè la seva intensitat és molt feble i els nostres ulls no són capaços d'acumular llum, sinó que la processen directament cap al cervell. En canvi, les càmeres fotogràfiques (ja siguin analògiques o digitals) acumulen llum durant un cert temps i, en augmentar la quantitat de llum, van apareixent els colors dels astres, per febles que siguin.



Figura 2. Fotografia d'uns quants minuts de temps d'exposició del cel.

Font: <http://cat.bloctum.com/fletxa/page/4/>

⁴ Fotografia amb temps d'exposició: és una fotografia que es fa durant un cert temps, i durant aquest temps capta el màxim de llum possible.

El color d'una estrella indica la seva temperatura superficial. Totes les estrelles tenen una temperatura superficial diferent, i entre elles és molt variada ja que hi ha estrelles que “només” estan a uns 2.200 K⁵ mentre que altres estan a uns 50.000 K. Així doncs, la temperatura superficial d'una estrella està relacionada amb el seu color, i contràriament al que es podria pensar, com més blava és una estrella més calenta està, i com més vermella és, menys freda està.

Aquesta és la relació color-temperatura superficial de les estrelles:

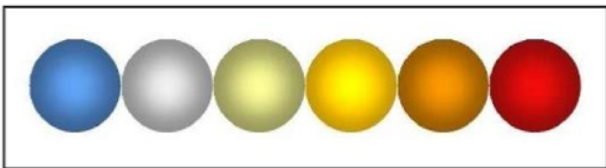


Figura 3. Els diferents colors de les estrelles segons les seves temperatures superficials.

Font: Power Point, curs Supernoves.

| COLOR | TEMPERATURA |
|-----------------------|---------------------|
| Blau | Més de 25.000 K |
| Blanc-blau | 11.000 K – 25.000 K |
| Blanc-blavós | 7.500 K – 11.000 K |
| Blanc-groguenc | 6.000 K – 7.500 K |
| Groc | 5.000 K – 6.000 K |
| Ataronjat | 3.500 K – 5.000 K |
| Vermell | 2.200 K – 3.500 K |

D'aquesta manera es pot fer una primera classificació de les estrelles segons la temperatura superficial. A més, aquesta temperatura també està relacionada amb altres característiques físiques de l'estrella, com es veurà més endavant.

El nostre Sol, per exemple, és una estrella groga perquè es troba a uns 5.800 K de temperatura.

4.1.3 La magnitud de les estrelles

Com hem vist, hi ha estrelles de tots els colors, encara que aparentment es vegin totes blanques. El que sí que es pot distingir, però, és la diferència de brillantor: hi ha estrelles més brillants, altres de més febles, i la immensa majoria són tan febles que no es veuen a simple vista, de tal forma que es necessita un telescopi per poder-les observar.

Ja al segle II aC, l'astrònom grec Hiparc de Nicea va fer un catàleg amb 850 estrelles, de les quals va proporcionar dues dades bàsiques: la seva posició i la

⁵ Kelvin (K): és la unitat de temperatura del sistema internacional. 1 K equival a 273'15 °C.

seva brillantor. Hiparc va establir una escala de brillantors, de magnituds, que més tard es va millorar, però que bàsicament segueix sent la que es fa servir avui en dia.

Hiparc va idear un sistema per a les magnituds de les estrelles. Les primeres estrelles que es veuen al vespre són les de primera magnitud, i les últimes que apareixen són de sisena magnitud. Així doncs, l'escala de magnituds és negativa, va en sentit contrari. Per exemple, una estrella de magnitud 4 és més feble que una altra de magnitud 2. Amb les correccions realitzades en els darrers segles ja es va veure que certes estrelles de primera magnitud eren més brillants que altres, i es van atribuir magnituds negatives. Així, l'estrella més brillant de tot el cel, Sirius, és de magnitud -1,47; alguns planetes com Venus o Júpiter arriben a tenir una magnitud encara més negativa, i el Sol té una magnitud de -26,75.

La part de l'astronomia que mesura la quantitat de la llum que arriba d'un astre determinat s'anomena Fotometria.

Magnitud aparent i magnitud absoluta

La magnitud d'una estrella depèn de dos factors independents. D'una banda, depèn de la quantitat d'energia que emet: la seva lluminositat, i d'altra banda, depèn de la distància que la separa de la Terra. En general, les estrelles més properes es veuen més brillants que les estrelles més llunyanes.

Cal poder distingir si una estrella es veu brillant perquè emet més llum o perquè està més a prop de nosaltres. Per això, es va inventar l'escala de magnituds absolutes. Es tracta de col·locar, de forma imaginària, totes les estrelles a la mateixa distància i calcular la magnitud amb la qual es veurien des de la Terra. S'anomena magnitud absoluta i es representa amb una lletina majúscula: *M*. En canvi, la magnitud amb la qual es veu un estrella de forma natural s'anomena magnitud aparent i es representa amb una lletina minúscula: *m*. Així doncs, tota estrella té dues magnituds: l'aparent, la qual es veu de forma natural, i l'absoluta, en la qual s'ha corregit el factor distància ([vegeu més informació sobre la magnitud de les estrelles a l'Annex 2.1](#)).

4.1.4 La massa de les estrelles

Totes les característiques físiques d'una estrella estan determinades per només dos paràmetres fonamentals: la massa i la composició química, la qual es veurà posteriorment.

La massa és la quantitat de matèria que conté, i depèn de la quantitat de gas que ha acumulat durant el seu procés de naixement. Com veurem més endavant, les estrelles neixen a partir del gas i pols d'enormes núvols que hi ha a les galàxies: els núvols moleculars. Aquest gas i pols es condensen i forma grumolls cada vegada més densos de matèria. De cada grumoll, en naixerà un estrella, i és l'atzar el que determina la quantitat de matèria que tindrà cadascuna d'elles.

La massa és el paràmetre més important d'una estrella, ja que d'ella depèn la mida, la temperatura superficial i el color de l'estrella; també determina tota la seva vida, és a dir, el temps que viurà, l'evolució que tindrà i quin serà el seu final quan mori: si es convertirà en nana blanca, en estrella de neutrons o en forat negre. Per tant, un estrella neix amb una quantitat de matèria determinada i d'això depèn la resta de la seva vida. Però hi ha límits a la massa de les estrelles ([vegeu els límits de massa de les estrelles a Annexos 2.2](#)).

4.1.5 La mida de les estrelles

De la mateixa manera que hi ha estrelles de diferents colors, temperatures i masses, també n'hi ha de diferents mides. Per exemple, el nostre Sol té una grandària mitjana. Les més grans s'anomenen estrelles gegants o supergegants, i les més petites estrelles nanes.

La veritat és que és molt difícil conèixer la mida d'una estrella. Actualment, amb els telescopis més grans del món i amb una tècnica d'observació molt complicada, la qual s'anomena interferometria òptica, s'ha pogut mesurar el radi d'algunes d'aquestes (molt poques). Evidentment, es tracta de les estrelles més grans i properes, com és el cas de la gegant vermella Betelgeuse, de la constel·lació d'Orió, però la immensa majoria d'estrelles només es veuen com a puntets brillants.

Es coneix el diàmetre de les estrelles no perquè es puguin mesurar directament,

sinó perquè es fa una estimació teòrica a partir de dos paràmetres físics que sí que es poden mesurar: la temperatura superficial de l'estrella (el color) i la seva lluminositat (l'energia que emeten).

Una mateixa estrella no sempre té la mateixa mida. Al llarg de la seva vida evoluciona i canvia la seva lluminositat, el color, la temperatura superficial i també el seu diàmetre. Durant la major part de la vida, les estrelles són estables, però, com es veurà més endavant, en les últimes etapes de vida canvien moltíssim.

Per poder comparar la mida de les estrelles amb alguna mesura coneguda, es pren el radi del Sol com a referència. El Sol té un radi de 695.508 km, que és aproximadament unes cent vegades més gran que el radi de la Terra.

4.1.6 La composició de les estrelles

La composició química indica quins elements formen l'estrella i en quines proporcions. Totes les estrelles tenen una composició molt semblant, ja que bàsicament estan formades d'un 75% d'hidrogen, un 24% d'heli, i un 1% d'altres elements químics, els quals estan en una proporció molt petita.

La composició química d'una estrella correspon a la de tot l'Univers. Aquests dos primers elements, l'hidrogen i l'heli, són d'origen primordial, ja que es van formar durant l'origen de l'Univers. La resta dels elements s'han creat a l'interior de les estrelles com a conseqüència de la seva activitat. Les estrelles són, per tant, les responsables de l'evolució química de l'Univers.

4.2 La classificació de les estrelles

4.2.1 Les classes espectrals i les classes de lluminositat

Existeixen dos tipus de classificacions de les estrelles. Una primera on classificarem les estrelles segons el tipus d'espectre, la qual va ser realitzada per Edward Pickering i unes ajudants que tenia de Harvard a principis del segle XIX.

La segona classificació determina la classe de lluminositat i va ser realitzada a l'observatori de Yerkes, Wisconsin, l'any 1943.

4.2.2 Les classes espectrals

Les classes espectrals estan establertes segons les característiques dels espectres de les estrelles i estan relacionades molt directament amb la seva temperatura superficial. El sistema utilitzat actualment consta de set classes espectrals principals, dins de les quals es pot incloure el 90% de les estrelles: O, B, A, F, G, K i M. Aquestes diferents classes espectrals es divideixen en més grups, ja que hi ha força diferència entre les de la mateixa classe.

Les estrelles més calentes pertanyen a la classe O5 amb temperatures superficials d'uns 50.000 K i les més fredes a la classe M8, amb temperatures d'uns 2.200 K. El Sol, és una estrella de tipus G

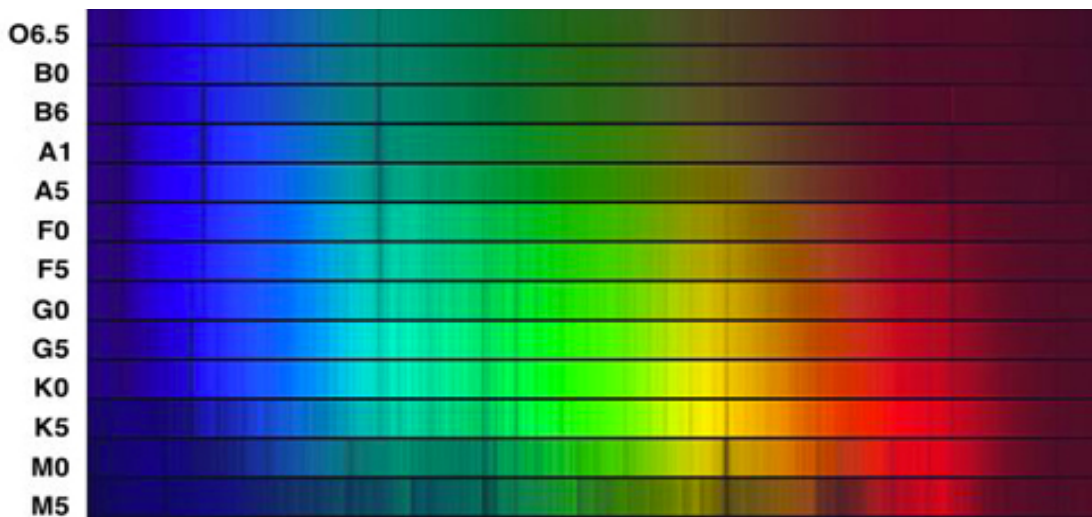


Figura 4. L'espectre dels diferents tipus d'estrella.

Font: <http://astrobloguers.org/2009/01/de-las-estrellas-y-constelaciones/>

Aproximadament un 70% de totes les estrelles són de tipus M, un 10% són de tipus K i un 4% són de tipus G. Com es pot veure, la gran majoria d'estrelles són poc lluminoses i petites. Només un 1% de les estrelles són de major massa i tipus O, B, A i F.

4.2.3 Les classes de lluminositat

Anys després de crear aquesta classificació estel·lar segons el tipus espectral, es va veure que era insuficient. Dins d'una mateixa classe espectral (amb una mateixa temperatura superficial i un mateix color) les estrelles poden tenir característiques físiques diferents, especialment en el diàmetre i la lluminositat

(dos paràmetres íntimament relacionats). Això es deu, bàsicament, que es troben en diferents etapes de la seva evolució. És per això que s'ha establert una altra classificació per classes de lluminositat. Es classifiquen en cinc classes principals:

- **I Supergegants:** Aquestes són molt massives i lluminoses, i estan al final de les seves vides. La supergegant més propera és Canopus (F0Ib) a 310 anys-llum de distància.
- **II Gegants brillants:** Tenen una lluminositat intermitja entre les gegants i les supergegants. Alguns exemples són Sargas (F1II) i Alphard (K3II).
- **III Gegants Normals:** Generalment són estrelles de baixa massa que estan al final de les seves vides i que s'han inflat per a convertir-se en una gegant. Aquesta categoria també inclou algunes estrelles d'alta massa evolucionant cap a l'estat de supergegants. Alguns exemples són Arcturus (K2III) i Hadar (B1III).
- **IV Subgegants:** Són estrelles que estan evolucionant cap a l'estat de gegants o supergegants. Alguns exemples són Alnair (B7IV) i Muphrid (G0IV).
- **V Nanes:** Aquestes són totes les estrelles normals que cremen hidrogen. Les estrelles, la majoria de la seva vida estan en aquesta categoria abans d'evolucionar en l'escala. Les estrelles de Classe O i B d'aquesta categoria són molt lluminoses i generalment més brillants que la majoria d'estrelles gegants. Alguns exemples són Sirius (A1V), i Vega (A0V).

Com hem vist en els exemples anteriors, a part de la classificació espectral, s'hi afegeix a darrere la classificació de la seva lluminositat. Així és com es designa a les estrelles, amb l'anomenada Classificació espectral de Yerkes. Per exemple, el Sol és una estrella del tipus G2V.

4.3 El diagrama de Hertzsprung-Russell (HR)

Una manera molt útil de representar totes les característiques anteriors és el diagrama de Hertzsprung-Russell (porta el nom dels seus autors), o diagrama HR. Es tracta d'una eina molt potent per als astrofísics. Podríem dir que és la taula periòdica de les estrelles.

El diagrama HR permet veure, d'un sol cop d'ull, la relació entre la classe espectral (i per tant la temperatura i el color) i la lluminositat de les estrelles. Es tracta d'un gràfic de doble entrada. A l'eix horitzontal, es representen els tipus espectrals de les estrelles (de vegades, ja que és equivalent, els colors o les temperatures). Es representa creixent de dreta a esquerra. A l'eix vertical, es representa la lluminositat absoluta de les estrelles o la seva magnitud absoluta, que és equivalent. Es representa creixent de baix a dalt i s'ha de pensar que la magnitud té una escala negativa.

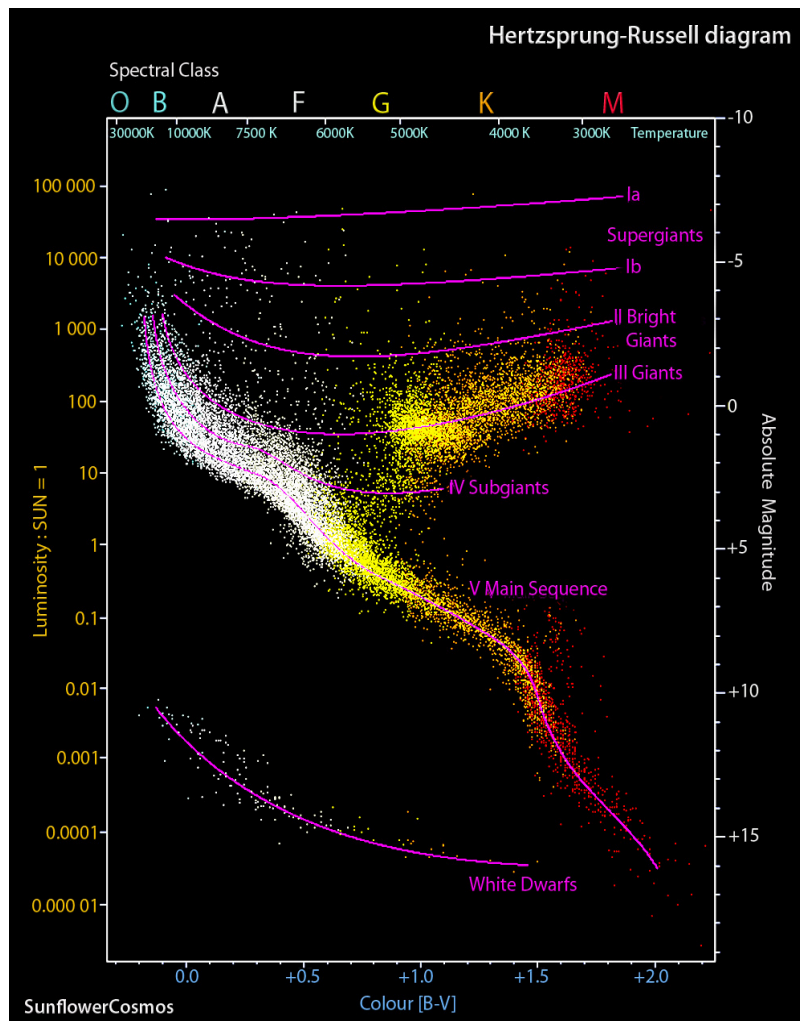


Figura 5. Diagrama de Hertzsprung-Russell (HR).

Font: <http://www.atlasoftheuniverse.com/catala/hr.html>

Quan se situen les estrelles dins del gràfic d'acord amb aquests dos paràmetres, s'observen zones més denses d'estrelles i zones gairebé buides. Hi ha tres zones principals plenes d'estrelles. En primer lloc la major part de les estrelles se situen en la diagonal que va de la part superior esquerra a la part inferior dreta,

anomenada Seqüència Principal; en segon lloc, s'omple la zona superior dreta, anomenada zona de les estrelles gegants i supergegants; i en tercer lloc, s'omple la zona inferior esquerra, la zona de les nanes blanques.

Hem de pensar que durant la major part de la vida les estrelles, aquestes estan estables però, com veurem més endavant, en les seves últimes etapes canvien moltíssim. Primer augmenten molt de grandària i es converteixen en estrelles gegants, i després perden la major part del seu gas i es converteixen en astres molt, molt petits: nanes blanques, estrelles de neutrons o forats negres. Per tant, hi ha dos grans grups d'estrelles: les que es troben en la seva etapa estable, i les que ja han evolucionat. Això significarà que les que estan estables es situen a la seqüència principal, i les que estan evolucionant s'aniran movent pel diagrama HR (vegeu per a més informació sobre el diagrama HR a Annexos 3).

4.4 L'estructura de les estrelles

Una estrella típica es divideix en tres parts: el nucli, el mantell i l'atmosfera.

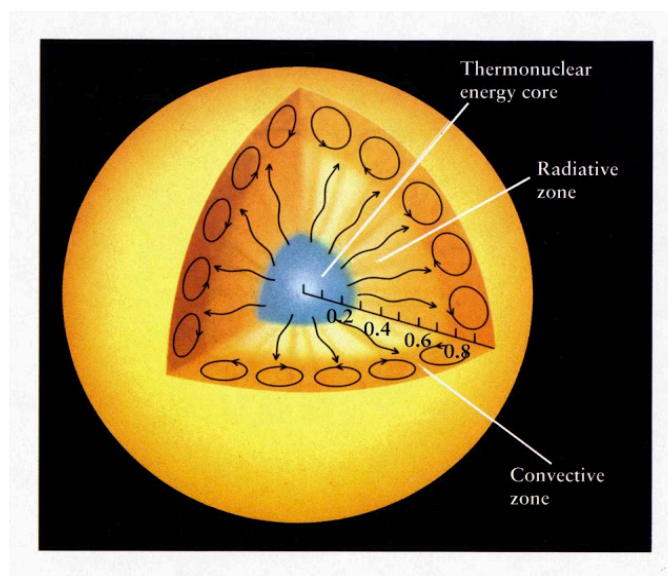


Figura 6. Parts d'una estrella.

Font: <http://enseriosraumatell.blogspot.com.es/2012/12/muy-buenas-de-nuevo-no-se-si-os-suena.html>

El nucli

És la part central de l'estrella, és la seva zona més densa i calenta, i és on es produeixen les reaccions nuclears que generen energia en forma de llum. Els centres de les estrelles són enormes centrals nuclears de fusió.

S'ha de recordar que les estrelles estan compostes per un 75% d'hidrogen i un 25% d'heli. A causa de la seva enorme temperatura en el seu interior, la matèria es troba en forma de plasma⁶. Això significa que hi ha una barreja de nuclis atòmics i d'electrons⁷ que no estan lligats entre si. Sobretot hi ha protons⁸ lliures (nuclis d'hidrogen) i electrons lliures.

En condicions normals, els protons es repel·leixen entre sí perquè tenen càrregues elèctriques positives i no arriben a xocar. Ara bé, a l'interior de les estrelles la temperatura i pressió són tan altes que alguns protons sí que poden xocar entre si. Quan això succeeix, entra en joc una altra força de la naturalesa: la força nuclear forta, que és atractiva i molt més intensa que la força electromagnètica. Aquesta força uneix els protons i els manté enganxats. Es diu que s'ha produït una reacció nuclear.

Així doncs, al centre de les estrelles es produeixen reaccions nuclears. En realitat sèries de reaccions nuclears que acaben per transformar els nuclis d'hidrogen en nuclis d'heli. A més, en aquest procés s'allibera energia en forma de radiació gamma, la més energètica de totes.

El mantell

És la part de l'estrella on es transporta l'energia cap a la seva "superfície". El transport d'energia es pot fer de dues maneres ben diferents: per radiació o per convecció, i normalment el mantell d'una estrella té una part que és radioactiva i una altra part que és convectiva. Quan més lluny del nucli, la temperatura disminueix, passant d'uns quants milions de graus en el centre a «només» uns quants milers de graus a la superfície.

- Transport per radiació

En el transport per radiació, la llum viatja per l'estrella, però no pot fer-ho lliurement perquè va xocant contínuament amb la matèria estel·lar: els àtoms i les partícules subatòmiques que es va trobant.

⁶ *Plasma*: Estat líquid de la matèria.

⁷ *Electró*: partícula subatòmica amb una càrrega elèctrica elemental negativa.

⁸ *Protó*: partícula subatòmica amb una càrrega elèctrica elemental positiva.

En aquest procés, la llum és absorbida i reemesa contínuament per la matèria, però la seva reemissió es produeix en qualsevol direcció, de forma aleatòria. Per això no viatja en línia recta cap a la superfície de l'estrella, sinó que és un viatge molt caòtic. La capacitat del material estel·lar d'aturar la radiació rep el nom d'opacitat. De mitjana, la radiació només avança a l'interior estel·lar uns pocs centímetres abans de ser absorbida. És com si hi hagués una boira molt espessa per a la llum.

Aquesta gran opacitat produeix dos resultats. En primer lloc, dificulta el pas de la radiació en el seu viatge cap a la superfície de l'estrella. La radiació triga una mitjana d'un milió d'anys en travessar l'estrella i sortir cap a l'espai (un cop ha sortit, en estar l'espai gairebé buit, ja pot viatjar a la velocitat de la llum sense més interrupcions). En segon lloc, la radiació va perdent gradualment energia en anar-se filtrant des del centre. Al centre de l'estrella, la major part de l'energia emesa ho és en forma de raigs gamma i raigs X. Quan la radiació ha aconseguit obrir-se pas fins a la superfície estel·lar s'ha convertit a freqüències molt més baixes, apareixent principalment com a llum visible.

- **Transport per convecció**

L'energia també pot ser transportada a través de l'estrella per convecció. És el procés que succeeix quan l'aigua bull en una olla. L'aigua del fons de l'olla s'escalfa per la calor del fogó i, per tant, s'expandeix. L'expansió fa que sigui més lleugera (menys densa) que l'aigua del seu voltant i per això puja. Immediatament és reemplaçada per aigua freda de dalt que, en ser més pesada (més densa), flueix cap avall per omplir el buit deixat. Aquesta aigua freda al seu torn s'escalfa i puja. Al cap d'una estona, s'estableix un cicle continu d'aigua ascendent i descendent. Això representa un corrent de convecció que transporta l'energia del fons del fogó per tota l'aigua. En les estrelles pot passar el mateix tipus de mecanisme. En aquest cas, la font de calor és el centre de l'estrella i la matèria estel·lar fa la funció de l'aigua en l'olla.

En el cas del transport per convecció hi ha un transport d'energia, però també de matèria. Aquesta és una diferència important del transport per radiació, que no requereix moviment de matèria. En el cas de la convecció, hi ha una important

barreja de matèria: la matèria més propera al nucli es desplaça cap a zones més superficials. Això és molt important. Aquest transport per convecció té lloc a la part més externa del mantell.

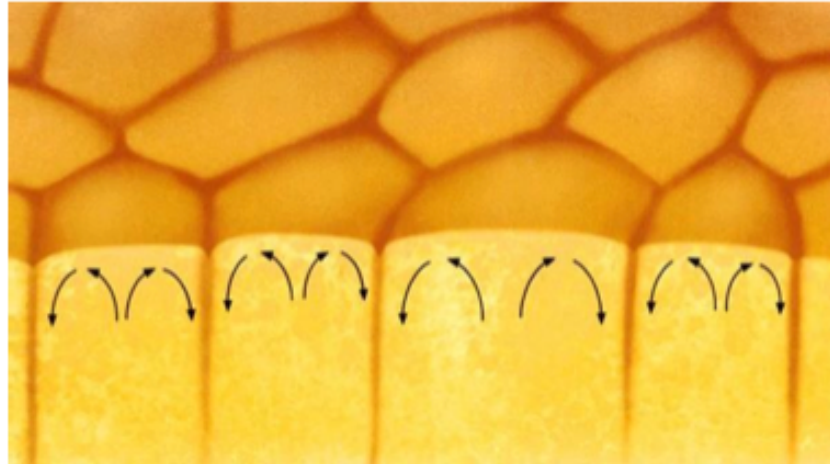


Figura 7. Cel·les convectives d'una estrella com el Sol.

Font: <http://astronomia-fisica-misiones-espaciales.blogspot.com.es/p/astronomia-2.html>

L'atmosfera

És la part més superficial de l'estrella. Es divideix en tres capes: fotosfera, cromosfera i corona. La fotosfera és la part visible d'una estrella, d'on prové la llum que s'observa, mentre que la cromosfera i la corona no es veuen gairebé mai. En el cas del Sol només es poden veure, de manera natural, quan hi ha un eclipsi total de Sol, durant els pocs minuts en què la Lluna oculta completament la brillant fotosfera solar.

5. EL NAIXEMENT DE LES ESTRELLES

Com bé se sap, les estrelles són esferes de gas molt calentes. Aquest gas prové de grans núvols gasosos que es troben en les galàxies. En un bon principi, aquests núvols estan estables, però de vegades es desestabilitzen i comencen a contraure's en diverses zones del gran núvol. A partir d'un núvol de gas es formen centenars o milers d'estrelles.

5.1 El medi interestel·lar

En una galàxia, l'espai entre les estrelles no és buit, sinó que està ocupat per grans quantitats de matèria constituïda per una barreja de gas i pols. Aquesta matèria és l'anomenat medi interestel·lar. Aquesta substància representa l'1% de la massa de les galàxies, i té una densitat baixíssima, de tan sols una partícula per cm^3 .

El gas representa el 99% del medi interestel·lar, i la seva composició és la mateixa que es pot observar en les estrelles i en l'Univers en general, és a dir, el 75% de la massa d'aquest és d'hidrogen, un 24% és d'heli i l'1% del gas que queda està format per altres elements químics.

L'1% restant del medi interestel·lar és pols, la qual està formada per partícules sòlides molt més grans, de la mida d'una micra (una mil·lèsima de mil·límetre), molt semblants a les partícules de fum. La seva composició és, bàsicament, de carboni i una mica de silici.

Tot aquest medi interestel·lar és molt irregular, ja que hi ha zones més denses que formen veritables núvols, mentre que altres zones són molt menys denses. També hi ha zones fredes i altres que estan a altes temperatures. Segons com sigui el núvol s'anomena amb un d'aquests noms: núvol molecular, regió HI, gas internúvol, regió HII o gas coronal. Com que hi ha núvols a diferents temperatures, el gas pot trobar-se en diferents estats. Si el núvol és molt fred el gas pot formar molècules (núvol molecular), si la temperatura és una mica més alta, es trenquen les molècules i el gas es troba en forma atòmica (regió HI), i si la temperatura és

encara més alta, el gas es ionitza⁹, els electrons s'escapen dels nuclis atòmics i es forma un plasma (regió HII).

5.1.2 Els núvols moleculars

Els núvols moleculars són les zones més denses i fredes del medi interestel·lar, que estan formats per gas i pols, com la resta del medi. Aquests es troben entre els objectes més massius de tota la galàxia, ja que la seva massa és fins a deu milions de vegades la massa solar, i és únicament superat per el forat negre¹⁰ que pot existir en el centre galàctic. Però, amb el que cap objecte galàctic els supera, és amb la seva mida, la qual pot arribar a 300 anys-llum¹¹. També són cossos molt freds, amb temperatures que oscil·len entre 10 i 90 kelvin, és a dir, de -260 a -170° C.

Com ja s'ha dit, la majoria del gas és hidrogen i heli, però també es troben traces de moltes altres molècules diferents: CO, CO₂, OH, H₂O, CH, CN, etc.

Aquests núvols són molt importants perquè és el lloc on neixen les estrelles. En la nostra galàxia es concentren en un anell al voltant del nucli que s'estén entre els 10.000 i els 25.000 anys llum del centre. El Sol es troba a uns 28.000 anys llum del centre de La Galàxia

5.1.3 Les regions HII

Les regions HII són zones on s'han format i se n'estan formant recentment. Generalment, les primeres estrelles que es formen són gegants blaves (amb masses d'algunes desenes de vegades la del Sol), amb temperatures superficials elevades (de l'ordre de 20.000 K, o més) i que emeten grans quantitats de radiació ultraviolada. Aquesta radiació és absorbida pel gas que es troba al seu voltant, que s'escalfa, es ionitza de forma parcial, i remet la radiació absorbida en forma de llum visible. Aquest procés s'anomena fluorescència i és el que dona

⁹ *Ionització*: Procés físic en el qual un àtom, en aquest cas de gas, es converteix en un ió en afegir-li o treure-li electrons.

¹⁰ *Forat negre*: és una concentració de matèria d'altíssima densitat, tal que la seva força gravitatòria és tan elevada que la velocitat d'alliberament és superior a la velocitat de la llum.

¹¹ *Anys-llum*: Distància que pot recórrer la llum en un any. Són 9,46 bilions de km.

lloc a la formació de les regions HII. Per això també es coneixen com a nebuloses d'emissió. En general aquestes regions són una part dels núvols moleculars.

La seva mida és d'uns centenars d'anys llum, tot i que n'hi ha de molt pocs anys llum. La massa total d'una regió HII oscil·la entre 100 i 100.000 vegades la massa solar. L'exemple més conegut de regió HII és la Gran Nebulosa d'Orió.

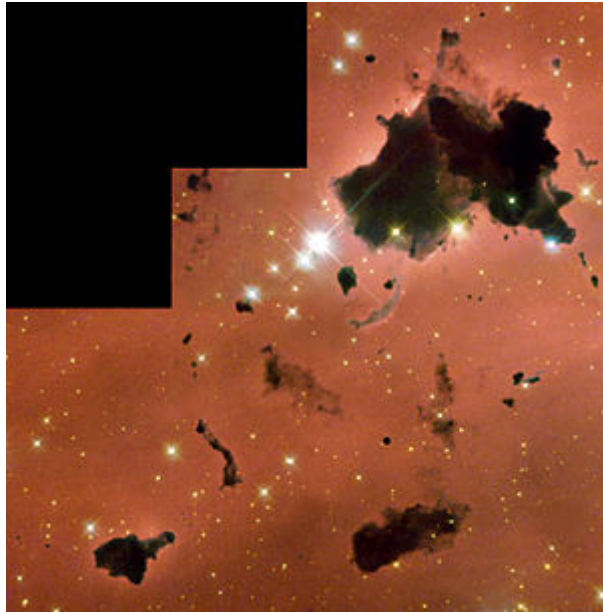


Figura 8. Interior d'una regió HII IC 2944. Telescopi Espacial Hubble (NASA i ESA)

Font: http://en.wikipedia.org/wiki/Bok_globule

La seva forma tendeix a ser esfèrica amb un diàmetre que equival a la distància a la qual ha estat capaç de penetrar la radiació de les estrelles acabades de néixer, ionitzant el gas al seu pas. A aquesta distància se la denomina radi de Stromgren, i la seva mida depèn de la densitat del núvol molecular i de la potència ionitzadora de les estrelles. Alhora, el gas s'escalfa en absorbir aquesta radiació, dispersant i disminuint la seva densitat. Per tant, dins d'un núvol molecular les regions HII són una mica menys denses i molt més calentes (amb temperatures entre 8.000 i 10.000 K) que el seu entorn immediat. Aquest fenomen es diu fotoevaporació i és el responsable de les capritxoses formes que prenen algunes regions HII a mesura que la radiació troba zones del gas més denses i, per tant, més difícils de "erosionar".

5.2 La formació de les estrelles

5.2.1 On es formen les estrelles?

Avui en dia encara es desconeixen tots els detalls del procés de la formació de les estrelles, però es té gairebé la seguretat que les estrelles només es formen a l'interior dels núvols moleculars. Això és degut a les seves elevades densitats i les seves baixes temperatures, ja que l'alta densitat provoca que els núvols es comprimeixin per efecte de la força d'atracció gravitatòria entre les partícules, mentre que les baixes temperatures signifiquen que l'agitació interna és petita i insuficient per dispersar el núvol i prevenir el col·lapse gravitatori que donarà lloc al naixement de les estrelles.

Un altre punt que sembla clar és que durant el transcurs d'aquest procés, els núvols moleculars es divideixen en nombrosos fragments, cadascun dels quals donarà lloc a una estrella independent. Una hipòtesi acceptada és que en primer lloc es formarien uns quants estels de gran massa (algunes desenes de vegades la massa del Sol) que ocasionarien la fragmentació de la resta del núvol en una miríada d'estrelles de mida semblant al Sol. Aquestes primeres estrelles massives (grans i calentes) converteixen el núvol molecular en una regió HII.

En general en una mateixa regió HII es formen alguns centenars d'estrelles en el transcurs d'uns pocs milions d'anys. Quan tot o quasi tot el material d'un núvol molecular s'ha concentrat en les estrelles o ha estat escampat per la seva radiació, el que queda és un grup d'estrelles d'edats semblants: són els cúmuls estel·lars oberts, i alguns encara estan rodejats de tènues nebulositats, les restes del que abans va ser un núvol molecular.

5.2.2 Col·lapse inicial

A l'interior d'un núvol interestel·lar, el gas es manté en equilibri hidrostàtic. Això vol dir que la força d'atracció entre les molècules que el componen (l'energia potencial, que té tendència a comprimir el núvol) s'equilibra perfectament per la pressió de gas (l'energia cinètica, que té tendència a dispersar-lo). Sota determinades condicions, aquest equilibri pot trencar-se i la pressió ja no és capaç de suportar el pes del núvol, que comença a col·lapsar.

Per trencar aquest equilibri es necessita algun estímul extern, una pertorbació. S'han identificat diversos possibles mecanismes pels quals el núvol pot començar la contracció, i amb ella, la formació estel·lar. El més eficaç sembla ser el de les ones de densitat originades per l'estructura espiral d'algunes galàxies. Són zones, en els seus braços, on hi ha més acumulació de matèria que a la resta de la galàxia, i en ells es produeix una important formació estel·lar. També es produeixen ones de densitat importants i brots de formació estel·lar quan dues galàxies xoquen entre si. En aquests processos, les estrelles estan tan separades que gairebé mai no xoquen, però el gas interestel·lar sí, i aquest resulta pertorbat.

Associat amb els braços espirals existeixen dos fenòmens que poden induir al trencament de l'equilibri del núvol, un dels quals és l'explosió d'una estrella propera a un núvol molecular, una supernova, la qual explicaré més detalladament més endavant. L'altre fenomen és la interacció gravitatòria entre dos núvols moleculars pròxims.



Figura 9. Xòc entre dues galàxies veïnes. La galàxia més gran es cataloga com NGC 2207, i la menor és IC 2163.

Font: <http://www.taringa.net/posts/imagenes/17731977/Lo-Maravilloso-del-Universo.html>

Encara que, com he dit abans, no es coneix amb detall com es formen les estrelles a partir d'un núvol interestel·lar, el procés, de forma general, podria ser el següent: a mesura que el núvol col·lapsa, es fragmenta en núvols cada vegada més petits, fins que els fragments obtinguts tenen una massa que pot formar una

estrella. Cadascun d'aquests fragments, a mesura que es contrauen, s'escalfen per efecte de la pèrdua d'energia potencial gravitatòria que s'ha convertit en energia cinètica (és a dir les partícules es mouen cada vegada a major velocitat) i comença a emetre radiació per desprendre's de l'energia sobrant. En altres paraules, el núvol en contracció està una mica més calent que el seu entorn i l'energia flueix de la part calenta cap a la freda. A aquestes temperatures (10 a 20 K), la radiació se situa a la zona de les microones o en l'infraroig llunyà de l'espectre electromagnètic. Alhora, aquesta radiació impedeix que el núvol s'escalfi en excés i l'agitació tèrmica pugui aturar el col·lapse.

Durant aquesta etapa, per tant, l'efecte de la força gravitatòria cap endins (el seu pes) és superior a l'efecte de l'agitació tèrmica que empeny les partícules cap enfora (la seva pressió interna). Mentre es manté aquest desequilibri, l'estrella està en formació. A mesura que el gas es fa més dens i opac, disminueix la pèrdua d'energia per radiació, la temperatura interna augmenta i el núvol deixa de fragmentar per esdevenir una esfera de gas en rotació. En aquest moment tenim ja un embrió estel·lar dins del núvol protoestel·lar.

5.2.3 Col·lapse final

Aquest núvol protoestel·lar continuarà col·lapsat fins que aconseguixi eliminar tota l'energia sobrant abans d'estabilitzar-se. Mentre, la temperatura interna continuarà augmentant fins arribar als 100 K, moment en què l'embrió estel·lar serà capaç de radiar en l'infraroig llunyà, longitud d'ona per la qual el gas és encara transparent. Això significa que aquesta part de l'evolució de l'estrella només és possible estudiar-la utilitzant llum infraroja.

La part central del núvol, augmenta la densitat i la temperatura de manera més ràpida que la resta. Quan arriba a una 2.000 K, les molècules d'hidrogen es dissocien i l'hidrogen i l'heli es ionitzen. Això permet absorbir l'energia perduda per la contracció, ja que tant la dissociació com la ionització absorbeixen energia, facilitant que el núvol continuï contraient-se. També és possible que alguns núvols deixin de contraure's.

La contracció prossegueix fins que el gas està prou calent com perquè la pressió interna del nucli sigui capaç de suportar el seu pes i impedir que continuï col·lapsant gravitatòriament. En aquest moment, es recupera l'equilibri hidrostàtic.

El procés ha durat, fins aquí, uns 100.000 anys. L'objecte resultant ja és una protoestrella.

5.2.4 El naixement de l'estrella

El procés d'acreció¹² continua, en gran part a través d'un disc que s'ha format al voltant, per efecte de la rotació del núvol en contracció. Els xocs entre les partícules han anat seleccionant les òrbites fins a formar un disc on les òrbites són coplanàries¹³ i per tant els xocs poc freqüents. En aquest moment s'originen forts vents estel·lars que expulsen grans quantitats de matèria seguint dos feixos en direccions oposades a través de l'eix de rotació del conjunt, segurament per la necessitat d'eliminar el moment cinètic del material en accreció. A més, en contreure's també apareix un camp magnètic cada vegada més intens dins de la protoestrella que accelera els àtoms ionitzats. Aquests fenòmens complexos són el resultat de la interacció entre la matèria caiguda sobre el nucli, la protoestrella i el camp magnètic. Aquest tipus d'estrelles en formació reben el nom de T Tauri. Quan la regió circumdant queda neta de gas, l'acreció s'atura, però l'estrella continua contraient-se, augmentant la mida i la temperatura del nucli.

Finalment, quan la temperatura del nucli arriba a uns deu milions de graus, l'hidrogen comença a produir reaccions nuclears, proporcionant una font d'energia que és capaç d'aturar definitivament la contracció i proporcionar l'energia necessària perquè l'estrella brilli durant milions (o desenes de milers de milions) d'anys. Ha nascut una estrella.

5.2.4.1 Nanes marrons

Quan el nucli no pot arribar a la temperatura de deu milions de graus, perquè la seva massa és massa petita, no poden començar les reaccions nuclears les quals són la font d'energia de tota l'estrella, i per tant no es formarà cap estrella. Els cossos que es formaran, els anomenem nanes marrons.

Són uns astres petits, típicament de la grandària de Júpiter o menys, la seva temperatura superficial es troba entre 1.000 i 2.000 K, la seva massa varia entre 10 masses de Júpiter i 80 masses de Júpiter, i brilla sobretot en infraroig.

¹² *Procés d'acreció*: Caiguda de material sobre el nucli en equilibri.

¹³ *Coplanar*: Conjunt de punts en l'espai els quals es troben tots en el mateix pla.

6. L'EVOLUCIÓ ESTEL·LAR

Tota la vida d'una estrella (els anys que viurà, quina serà la seva evolució i com morirà) depèn de la seva massa inicial. Aquest és el paràmetre, s'anomena funció inicial de massa i és un dels més importants d'aquests astres (vegeu funció inicial de massa a Annex 4).

6.1 La fase més llarga de la vida estel·lar. La combustió de l'hidrogen.

En l'apartat anterior, es deia que quan es forma una protoestrella és quan comencen les reaccions dins del seu nucli i, per tant, es comença a cremar l'hidrogen per mantenir la seva estructura estel·lar. Durant el temps en què les estrelles cremen aquest hidrogen dins del seu nucli, es situen en la seqüència principal del diagrama HR, on passen el 90% de la seva vida.

Hi ha dues formes de cremar aquest hidrogen, el qual varia en funció de la seva massa: si la massa de l'estrella és menor que 1,5 masses solars, les estrelles cremen l'hidrogen a través dels cicles protó-protó (pp); si la seva massa supera aquest valor, la combustió de l'hidrogen es fa a través del cicle CNO. El resultat dels dos processos és idèntic, on quatre protons es transformen en un nucli d'heli.

El cicle protó-protó

Els cicles pp són la font d'energia solar i es divideixen en tres subcadena diferents:

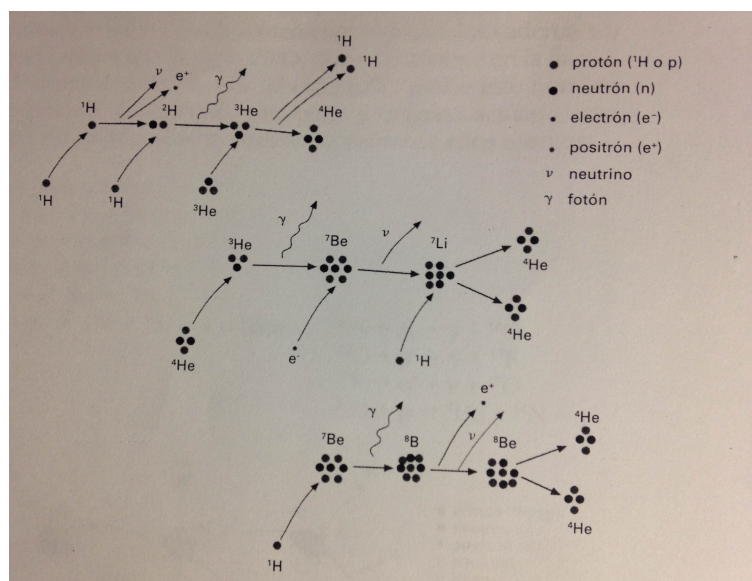
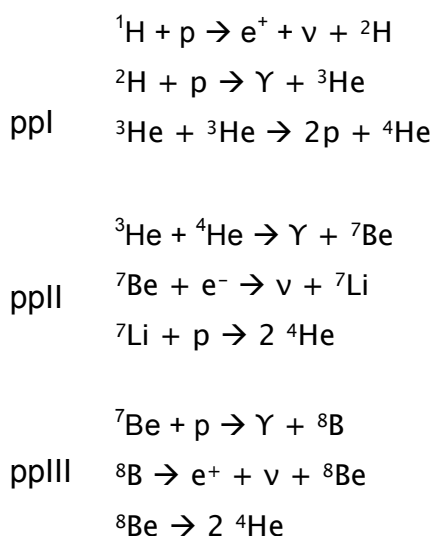


Figura 10. Cadenes protó-protó.

El cicle CNO

Si la temperatura central és suficientment elevada, el cicle pp és menys eficaç que el cicle CNO i, per tant, aquest es converteix en la principal font d'energia de l'estrella. El cicle CNO rep aquest nom perquè els nuclis de carboni, nitrogen i oxigen actuen com a catalitzadors¹⁴ de les reaccions, però sense consumir-se a si mateixos:

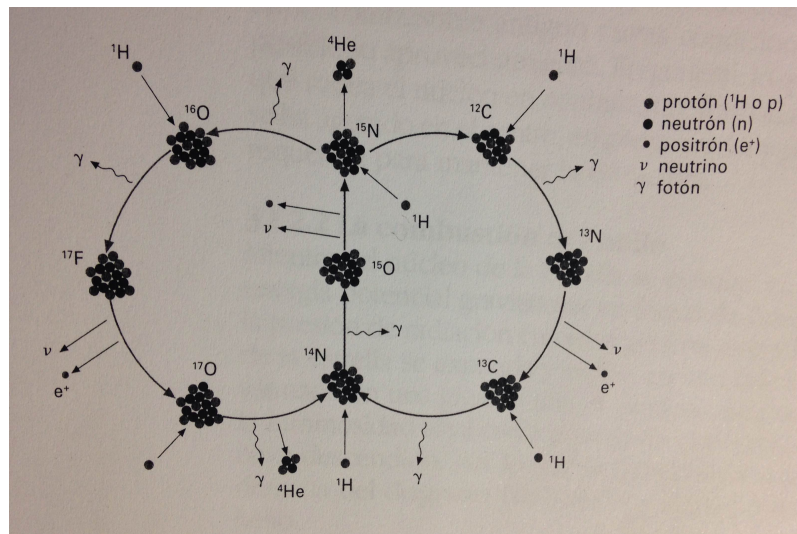
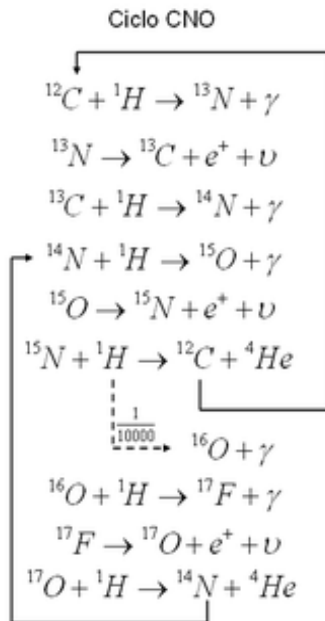


Figura 11. Cicle CNO

Per tant, fins que l'hidrogen no sigui insuficient, les estrelles l'aniran cremant per tal de mantenir l'estructura de l'estrella i la seva lluminositat. Un cop aquest hidrogen s'esgoti, les estrelles actuaran diversament, en funció de la seva massa.

6.2 Estrelles de massa baixa i intermèdia ($M < 9 M_{\text{Sol}}$)

6.2.1 Les estrelles entre 0,08 i 0,5 masses solars

En el moment en què tot l'hidrogen ha estat cremat, l'estrella és una bola composta gairebé exclusivament per heli, i les reaccions de fusió s'aturen per manca de combustible. Quan això succeeix, l'equilibri hidrostàtic es trenca ja que ha desaparegut la font d'energia que proporcionava la pressió que equilibrava el pes de l'estrella, i la gravetat torna a guanyar. Tot l'astre comença a contraure's sota el seu propi pes i es torna a escalfar, sobretot en la part central.

¹⁴ Catalitzador: És una substància que incrementa la velocitat d'una reacció química.

En aquest cas, en les estrelles més petites i menys massives, amb masses des de 0,08 fins a 0,5 masses solars, aquesta contracció i escalfament no porta cap conseqüència important. La pressió i temperatura del gas no augmenta el suficient perquè es produeixin més reaccions nuclears, i l'estrella es va comprimint fins que ja no es comporta com un gas, sinó més aviat com un metall. La matèria en aquest estat rep el nom de matèria degenerada i té diverses propietats curioses: pot suportar grans pressions sense cap canvi apreciable de volum, i emet calor per conducció de forma eficient. Aquesta estrella s'ha convertit en una nana blanca d'heli.

6.2.2 Estrelles entre 0,5 i 7 masses solars

Igual que en el cas de les estrelles més petites, un cop esgotat l'hidrogen en el seu nucli, les reaccions de fusió s'aturen per manca de combustible. L'equilibri hidrostàtic es trenca i la gravetat torna a guanyar la batalla. Tot l'astre comença a contraure's sota el seu propi pes i es torna a escalfar, sobretot en la seva part central. Però ara, en el cas de les estrelles de masses una mica superiors a les anterior, d'entre 0,5 i 7 masses solars, la seva contracció i escalfament serà important i portarà conseqüències.

Quan l'estrella es torna a escalfar, la capa de gas del voltant del nucli arribarà a la temperatura suficient perquè l'hidrogen es fusioni produint heli a partir de les mateixes reaccions amb què abans ho havia fet en el nucli. Això s'anomena combustió en capa. L'energia despresa fa augmentar la pressió del gas a la resta de l'estrella i aquesta s'infla per efecte d'aquesta pressió addicional cap enfora. Aquesta inflació fa que les capes més externes de l'estrella s'allunyin entre 100 i 250 vegades més enllà de la seva distància inicial amb el nucli. En aquestes circumstàncies, l'estrella dissipa molta energia (és molt lluminosa) però, en haver augmentat molt més la seva superfície, l'energia despresa per unitat de superfície és petita i la temperatura superficial és baixa, per la qual cosa brilla sobretot en color vermell. S'ha convertit en una estrella gegant vermella.

Quan una estrella es converteix en gegant vermella, es mou dins del diagrama HR. Surt de la seqüència principal, després de molt temps d'estar-hi, i es mou cap amunt i cap a la dreta, situant-se en la regió de les estrelles gegants.

A partir d'aquesta etapa, les estrelles tenen una estructura "contradictòria": un nucli petit, dens i calent, i un embolcall enorme, tènue i fred.

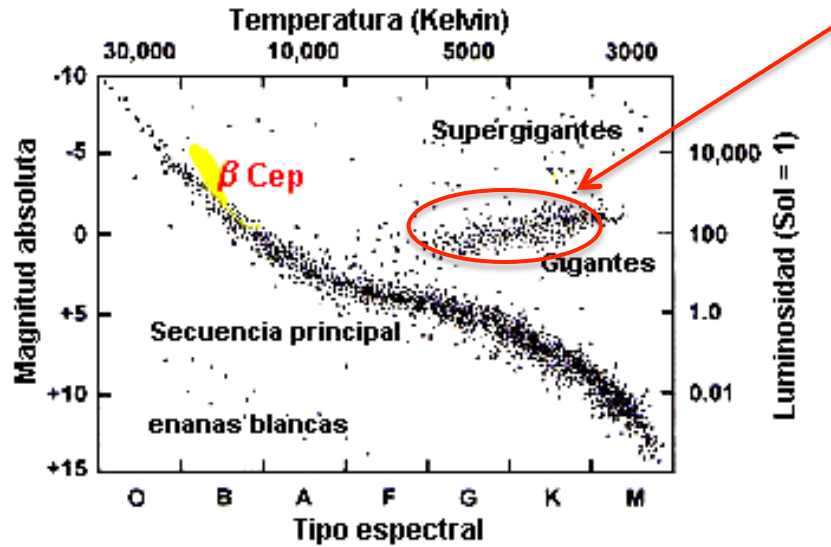


Figura 12. Posició de les gegants vermelles en el diagrama HR.

Font: <http://www.portalplanetasedna.com.ar/estrellas.htm>

En el moment en el qual la temperatura del nucli arriba als 100 milions de graus, amb una densitat de 10.000 g/cm^3 , l'heli comença a fusionar-se, per tant comencen a haver-hi altre cops reaccions nuclears. La fusió de l'heli ha trigat bastant a arribar perquè té un problema: la fusió de dos nuclis d'heli-4 produeix un isòtop de Beril·li-8 que és altament inestable i es desintegra tornant a donar dos nuclis d'heli. Per convertir l'heli en altres substàncies cal que tres nuclis col·lideixin¹⁵ simultàniament, procés anomenat triple alfa. És molt difícil que es produeixi aquest xoc simultani a tres bandes, i per això cal aquesta enorme temperatura de 100 milions de graus.

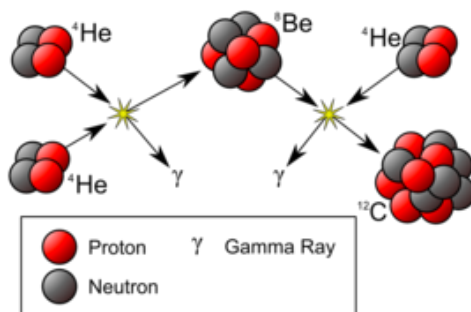


Figura 13. Procés triple alfa, in xoquen tres nuclis d'heli per formar un nucli de carboni.

Font: http://es.wikipedia.org/wiki/Proces_o_triple-alfa

¹⁵ Col·lidir: Xocar dos cossos.

L'inici de la combustió de l'heli és molt diferent segons la massa de l'estrella. Així, per a les estrelles menys massives aquest inici és explosiu; mentre que per a les estrelles més massives és un inici ben tranquil. La frontera està situada al voltant de les 2,25 masses solars.

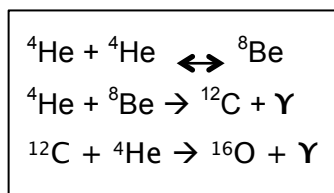
- Estrelles amb massa menor que 2,25 masses solars

Quan les estrelles són menors de 2,25 masses solars, el seu nucli es degenera¹⁶. Quan comença la fusió de l'heli la calor generada no produeix una expansió com passaria en una estrella ordinària, com s'ha dit abans. Sinó que en aquest cas, la matèria degenerada s'escalfa ràpidament. Això incrementa el ritme d'interacció dels nuclis d'heli, es genera molta energia i la temperatura es dispara. Molt ràpidament es produeix un procés d'allau, la situació es torna completament inestable i es produeix en el nucli una sobtada explosió d'energia, anomenada flaix de l'heli. Aquesta explosió no s'observa des de l'exterior perquè queda esmorteïda¹⁷ per tot l'embolcall de l'estrella, encara que a vegades pot produir una petita pèrdua de massa. Aquest procés provoca una expansió del nucli, que seguidament torna al seu estat gasós anterior i segueix fusionant heli d'una forma tranquil·la.

- Estrelles amb massa major que 2,25 masses solars

Per altra banda, les estrelles amb masses més grans de 2,25 masses solars arriben a fer la fusió de l'heli sense que el seu nucli estigui degenerat i no es produeix el flaix de l'heli, sinó que la seva combustió s'inicia d'una forma tranquil·la.

Durant la fusió de l'heli, les reaccions nuclears que es produeixen són:



γ = fotó

¹⁶ *Matèria degenerada*: aquella matèria en la qual una fracció important de la pressió prové del principi d'exclusió de Pauli, que estableix que dos fermions (leptons o quarks) no poden tenir els mateixos nombres quàntics.

¹⁷ *Esmorteir*: Fer menys viu, intens, violent.

La primera reacció és molt inestable, i per això es produeix en ambdues direccions. Cal que en el mateix instant es produeixi la segona reacció: el beril·li-8 es fusioni amb heli-4 per formar carboni-12 més energia. Al seu torn, el carboni-12 reacciona amb l'heli-4 i es forma oxigen-16. Per tant, la fusió de l'heli produeix carboni i oxigen a parts iguals.

Al diagrama HR l'estrella s'ha desplaçat cap avall i cap a l'esquerra, i s'ha situat en l'anomenada branca horitzontal, on l'estrella es manté estable durant un temps, cremant heli en el seu nucli i cremant hidrogen en la capa que envolta el nucli. Aquesta nova etapa d'estabilitat dura molt menys que l'etapa de la Seqüència Principal, aproximadament una desena part que l'anterior.

En aquestes estrelles, un cop esgotat l'heli, comença una nova fase de contracció del nucli, ara compost per carboni i oxigen, però que no pot prosperar molt. Així, l'energia que s'allibera és capaç de provocar la fusió de l'heli en una capa al seu voltant i de mantenir la capa de fusió de l'hidrogen en una altra capa més externa. Tot i que encara no coneixem el procés amb detall, tot sembla indicar que aquestes dues capes en combustió simultània produeixen inestabilitats en l'estrella que acaba amb l'expulsió de gran part del seu embolcall d'hidrogen. L'estrella es queda només amb el nucli de carboni i oxigen al voltant del qual hi ha dues capes actives: la primera d'heli i la segona d'hidrogen, que al final s'apagaran. Aquest nucli acaba formant una nana blanca de carboni i oxigen, al voltant de la qual hi ha un embolcall de gas expulsat que s'allunya de l'estrella central, formant el que es coneix com una nebulosa planetària.

Un exemple d'una estrella amb aquestes característiques, és el Sol. Això vol dir que quan aquest arribi al final de la seva vida, tindran lloc totes aquestes reaccions que s'han explicat, i es convertirà en una nana blanca.

Durant aquest procés, en el diagrama HR l'estrella torna a ascendir cap a la zona de les estrelles gegants per l'anomenada branca asimptòtica. Un cop arriba a dalt d'aquesta recta, l'estrella s'inestabilitza i es forma la nebulosa planetària. En aquest moment, l'estrella es mou horitzontalment cap a l'esquerra primer, i cap avall després, travessant tot el diagrama HR, i situant-se a la zona de les nanes blanques.

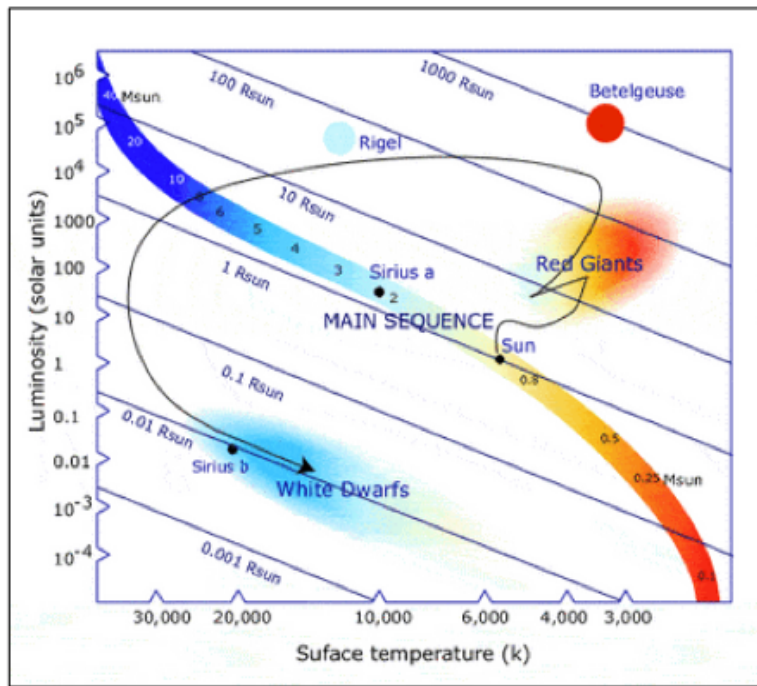


Figura 14. Moviment d'una estrella com el Sol pel diagrama HR al llarg de la seva vida.

Font: Power Point, curs Supernoves.

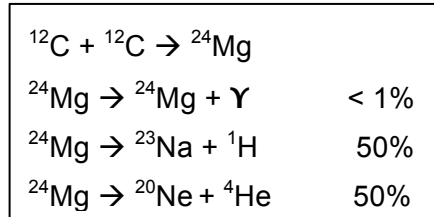
6.2.3 Estrelles entre 7 i 9 masses solars

Quan es tracta d'estrelles d'entre 7 i 9 masses solars, les seves primeres etapes són idèntiques que en el cas de les estrelles que acabem de veure. Primerament es trenca l'equilibri hidrostàtic i l'estrella es comença a contraure. La seva pressió augmenta i comença la combustió en capa de l'hidrogen. Això provoca una enorme expansió de les seves capes més externes i l'estrella es converteix en una gegant vermella. Igual que abans, en el diagrama HR l'estrella surt de la Seqüència Principal i es mou cap a la regió de les gegants vermelles.

Quan el nucli de l'estrella arriba a 100 milions de graus comença la fusió de l'heli. En aquest cas, el nucli no està degenerat i no es produeix flaix de l'heli. A partir d'ara l'estrella té una nova etapa tranquil·la, tot cremant heli en el seu nucli i hidrogen en la capa contigua al nucli. En el diagrama HR, l'estrella es mou cap a baix a l'esquerra, situant-se en la branca horitzontal.

Quan s'esgota l'heli del nucli, l'estrella es torna a contraure, augmentant una vegada més la temperatura i la pressió. Aquí però, l'estrella actua diferent, perquè les seves característiques són diverses. Ara, com que la massa és major que abans, el nucli pot arribar fins a 600 milions de graus. A aquesta temperatura comença la fusió del carboni, produint-se un flaix del carboni, el qual és semblant al de l'heli.

En aquest procés, el carboni-12 es fusiona amb si mateix formant magnesi-24 en un estat excitat. El magnesi es desexcita donant lloc a isòtops de magnesi-24, sodi-23, i neó-20 més heli-4, segons les següents reaccions nuclears:



Al costat de cada reacció s'indica la proporció de cadascuna de les desintegracions. Com es pot veure, pràcticament en la meitat dels casos es forma sodi, i en l'altra meitat neó.

Un cop més, quan s'esgota el combustible del nucli, el qual en aquest cas serà el carboni, es trenca l'equilibri hidrostàtic i l'estrella es torna a contraure. Ara, com que la massa no és suficient per arribar a una certa temperatura, el nucli es va degenerant i es forma una nana blanca, en aquest cas formada per oxigen neó i magnesi; mentre que el seu embolcall és expulsat en forma de nebulosa planetària.

6.2.4 Les seves morts

6.2.4.1 Les nebuloses planetàries i les nanes blanques

Les nebuloses planetàries són núvols d'aspecte arrodonit, que envolten algunes estrelles molt calentes, les nanes blanques.

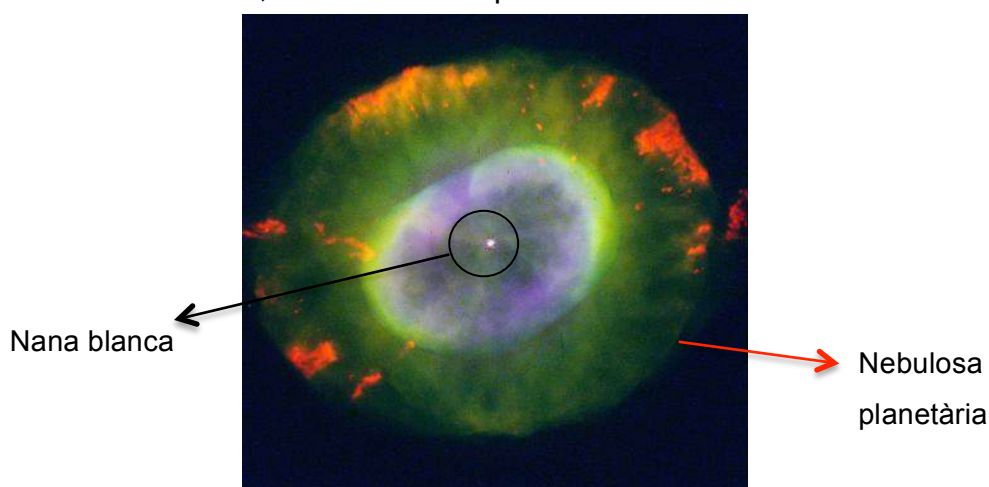


Figura 15. Nebulosa planetària

Font:

<http://astroriasbaixas.org/2010foro/viewtopic.php?f=10&t=627>

Una nebulosa planetària té una massa d'entre unes poques dècimes de la massa solar i unes poques masses solars (en funció de la massa inicial de l'estrella que l'ha generat) i un diàmetre proper a un any-llum. Aquesta està en expansió a unes desenes de km per segon, la qual cosa la dispersarà per l'espai en un període màxim de 100.000 anys. Aquesta curta durada, per a l'Univers, explica que se'n coneguin poques. Malgrat la seva relativa petitesa són astres molt bells.

Aquestes brillen gràcies a les seves nanes blanques centrals. Les nanes blanques es troben a gran temperatura i la seva radiació ultraviolada ionitza les capes externes que l'estrella havia expulsat: la nebulosa planetària. Si s'obté l'espectre d'una nebulosa planetària s'observen línies d'emissió molt intenses, sobretot de l'hidrogen, encara que també d'altres elements químics.

Pel que fa les nanes blanques, representen l'últim estadi d'evolució de les estrelles que tenen una massa inicial d'entre 0,08 i 9 masses solars. Ara bé, també s'ha vist que hi ha tres tipus de nanes blanques diferents:

- **Nanes blanques d'heli**
- **Nanes blanques de carboni-oxigen**
- **Nanes blanques d'oxigen-sodi-neó**

Les propietats de les nanes blanques són molt sorprenents i sense cap tipus de paral·lelisme amb les estrelles "normals". Tenen una massa semblant al Sol, una mida semblant a la Terra, una densitat enorme i la matèria que les compon està degenerada.

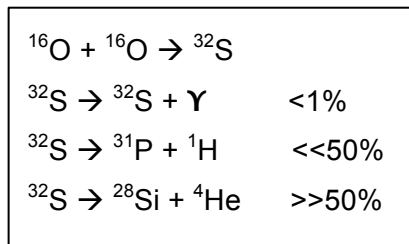
6.3 Estrelles de massa elevada ($9 M_{\text{Sol}} < M < 30 M_{\text{Sol}}$)

Les estrelles amb una massa superior a 9 masses solars passen per totes les etapes que s'ha vist fins ara, però, aquestes estrelles més grans cremen molt més ràpidament. En pocs milions d'anys (entre 10 i 20) passen per totes les fases de fusió nuclear, tant les explicades fins ara com les que les seguiran. En la fase de gegants vermelles, i en les successives, la seva mida augmenta fins a 500 vegades o més la del Sol.

El procés de contracció i escalfament del nucli de l'estrella i, per tant, de fusió nuclear dels diferents elements que s'obtenen en cada fase es va repetint. Es van

aprofitant cada vegada com a combustible per a la nova etapa els elements químics que són les cendres de la combustió anterior.

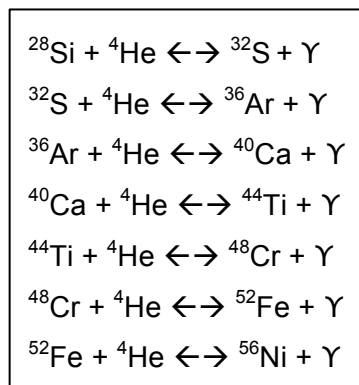
Continuant amb les reaccions nuclears que s'explicaven anteriorment amb les estrelles de masses inferiors, en aquestes quan s'esgota el carboni, el nucli de l'estrella torna a contraure's i a escalfar-se. Quan arriba als 1.500 milions de graus comença a fusionar l'oxigen formant isòtops de silici- 28, fòsfor-31 i sofre-32, segons les següents reaccions nuclears:



En primer lloc, l'oxigen-16 es fusiona amb si mateix donant lloc a sofre-32 en estat excitat que, en desexcitar-se, forma els tres isòtops abans esmentats: sofre-32, fòsfor- 31 i silici-28. Com es pot veure per les proporcions de cadascuna de les reaccions, sobretot es forma silici.

En aquesta etapa les estrelles tenen el nucli en plena fusió de l'oxigen, al voltant del qual hi ha una capa on es fusiona el carboni, al voltant de la qual hi ha una capa on es fusiona l'heli, al voltant de la qual hi ha una capa on es fusiona l'hidrogen, i al voltant de la qual hi ha una enorme capa d'hidrogen sense fusionar.

Un vegada més, quan l'oxigen central s'esgota, el nucli de l'estrella es contrau i s'escalfa. Quan la temperatura central arriba a 2.700 milions de graus comença la fusió del silici i del sofre, donant lloc a diferents isòtops fins al ferro, segons les següents reaccions nuclears:



A causa d'aquestes reaccions, al nucli de l'estrella es crea una bola de ferro d'una massa sembla al Sol. En aquest moment l'estrella té una estructura en forma de ceba: un nucli de ferro embolcallat per capes que cremen termonuclearment elements de masses atòmiques cada vegada més baixes.

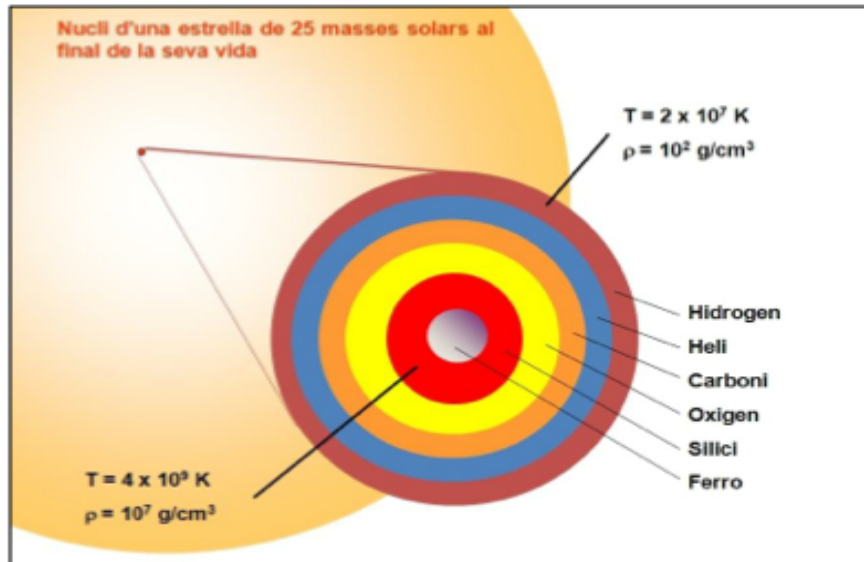
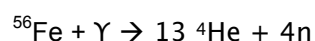


Figura 16. Nucli d'una estrella de 25 masses solars al final de la seva vida.

Font: Power Point, curs Supernoves.

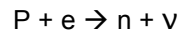
Sigui quina sigui la massa de l'estrella, cap d'elles pot evolucionar més enllà del nucli de ferro. La raó d'això es troba en que el ferro és l'element més estable de la natura, això significa que si se l'intenta fusionar amb qualsevol altre nucli per produir un element de pes atòmic més alt, no desprèn energia, sinó que la consumeix. Les estrelles que arriben a aquesta etapa acaben la seva vida amb una brutal explosió, coneguda com a supernova.

Així doncs, a partir d'ara les reaccions nuclears de ferro i níquel no subministraran energia, sinó que necessiten d'ella per produir-se. A més, en aquest moment, la temperatura és brutalment alta, d'uns 5.000 milions de graus, i això porta a que els fotons gamma generats són tan energètics que poden arrencar protons i neutrons dels nuclis de ferro. Tot això provoca una situació catastròfica: cada nucli de ferro es descompon en tretze nuclis d'heli i quatre neutrons.



La reacció produïda és altament endotèrmica. La pressió cau en picat i el nucli col·lapsa sobre si mateix.

Simultàniament, els nuclis atòmics comencen a capturar electrons, com un mecanisme per vèncer la pressió degenerada dels electrons, i els protons reaccionen amb els electrons i es converteixen en neutrons més neutrins (ν). Aquest procés s'anomena neutronització.



En aquest moment, les capes que envolten el nucli col·lapsat cauen cap al centre a gran velocitat empenyides per la força de la gravetat del nucli, seguides per les capes més externes que cauen més lentament. En el moment que la densitat central arriba a ser de l'ordre de la densitat de la matèria nuclear¹⁸, la matèria que arriba no es manté en el nucli, sinó que rebota en xocar amb ell i és expulsada cap enfora de l'estrella. Aquesta matèria xoca perquè el nucli és tan dens que al arribar amb una velocitat molt gran es produeix un xoc, el qual produirà una ona de xoc que acaba estripant, escampant, totalment la resta de l'estrella. Es produeix, per tant, una explosió que rep el nom de supernova gravitatòria. També es produeix una enorme quantitat de neutrins en el procés de neutronització que escapen de l'estrella i ajuden a l'expansió de la supernova.



Figura 17. Supernova 1994D de la galàxia NGC 4526

Aquesta explosió no trenca totalment l'estrella sinó que queda un petit astre central.

¹⁸ *Matèria nuclear*: matèria constituïda per protons i neutrons, amb una pressió i densitat crítica.

Si l'estrella tenia com a màxim unes 30 masses solars inicials (aquest límit és bastant imprecís), ha arribat a aquesta etapa amb un nucli que no arriba a la massa límit d'Oppenheimer-Volkoff¹⁹, que se situa entre 2,5 i 3 masses solars. En el seu centre queda un residu format per les restes de l'antic nucli de ferro de l'estrella, que ha acabat convertint-se en una bola composta, bàsicament, de neutrons, que rep el nom d'estrella de neutrons. Els neutrons fan una pressió molt gran per això poden suportar masses d'entre 2,5 i 3 masses solars. Aquesta pressió degenerada que exerceixen els neutrons és capaç d'aturar el col·lapse d'aquest nucli.

6.3.1 Les seves morts

6.3.1.1 Les supernoves gravitatòries

De tant en tant apareix una estrella nova en el cel. Fa uns segles, els astrònoms pensaven que es tractava d'estrelles que naixien, d'aquí el nom que els van posar. Però avui en dia es sap que tant les noves com les supernoves són explosions estel·lars, que representen la fase final d'algunes estrelles, la seva mort.

Normalment aquestes estrelles noves es troben en altres galaxies, ja que si fossin a la nostra es veurien a ple dia a causa de la seva alta lluminositat. En la nostra galàxia se n'han observat molt poques.

Totes les supernoves tenen una corba de llum semblant, amb una molt ràpida creixuda inicial, que representa l'explosió, i un descens lent de diversos mesos. Normalment una supernova arriba a assolir una lluminositat màxima de -18, magnitud absoluta, emetent tanta energia com una galàxia sencera, encara que algunes d'elles arriben a magnituds més negatives, és a dir són més lluminoses.

¹⁹ *Límit de Tolman-Oppenheimer-Volkoff*: la massa teòrica màxima que pot assolir una estrella de neutrons.

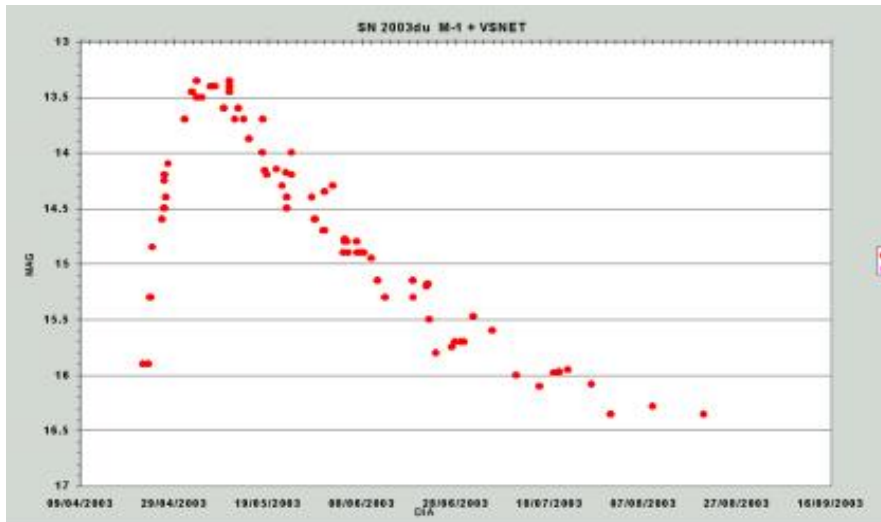


Figura 18. Corba de llum d'una supernova típica.

Font:

<http://www.astrosurf.com/blazar/Inf2003/SUPERNOVAS%202003%20Web.htm>

A grans trets, hi ha tres tipus diferents de supernoves. El primer tipus són les supernoves gravitatòries, les que s'ha vist fins ara. Es produeixen en estrelles massives a causa de l'enfonsament i el rebot de les seves capes més externes. El segon tipus són les supernoves termonuclears. Aquestes supernoves es formen en sistemes estel·lars dobles tancats, molt units, on una de les estrelles és una nana blanca que està robant gas a l'altra estrella, i en fer-ho torna a tenir reaccions nuclears i acaba explotant. El tercer tipus són les més energètiques de totes, les supernoves de creació de parells o hipernoves (es veuran més endavant). Aquestes explosions es deuen a l'enfonsament gravitatori d'estrelles altament massives, més grans de 100 masses solars.

Dins les supernoves gravitatòries, que són amb les que ens centrarem més, hi ha tres subtipus diferents: les SN II, les SN Ib, i les SN Ic. Aquesta classificació es deu a la diferència dels seus espectres: les SN II presenten línies d'hidrogen, mentre que les SN Ib i SN Ic no presenten aquestes línies. Ara bé, les SN Ib presenta línies d'heli i poques o cap línies de silici, mentre que les SN Ic no presenta línies de silici ni d'heli. La diferència física entre elles és la seva diferent massa inicial. Les SN Ib i SN Ic procedeixen d'estrelles supergegants amb radiació molt intensa i gravetat superficial molt feble. Poc abans d'explotar com a supernoves, els intensos vents estel·lars d'aquestes estrelles han expulsat la capa més externa d'hidrogen, per això els seus espectres no presenten línies

d'aquest element en el moment de l'explosió.

Com s'ha vist, a l'interior d'una estrella es sintetitzen tots els elements químics des del heli fins al ferro i níquel. La resta d'elements químics (fins als 110 que es coneixen aproximadament) es sintetitzen durant les explosions de les supernoves. S'allibera tal quantitat d'energia simultàniament que es produeix una multitud de reaccions nuclears que donen lloc als elements químics des del ferro en endavant. A més tot aquest gas que s'emet serveix per enriquir el medi interestel·lar amb elements cada vegada més pesats. Aquest gas servirà per formar noves estrelles i així reprendre el cicle vital de les estrelles.

6.3.1.2 Estrelles de neutrons

Les estrelles de neutrons són uns astres molt peculiars en els quals la seva densitat és elevadíssima i la seva grandària és molt petita.

Com s'ha vist, aquests astres estan formats bàsicament per neutrons, sense espais lliures entre ells. La seva densitat és de 10^{15} g/cm³. Per comparar, la Terra té una densitat mitjana de 5,5 g/cm³, i les seves mides són molt diferents, on la Terra és molt més gran que les estrelles de neutrons, ja que aquestes normalment tenen un radi d'uns 10 km.

La seva estructura interna presenta diverses capes, amb característiques i composicions diferents. L'escorça superficial té un pocs centenars de metres de gruix i està constituïda per ferro (el que hi havia al voltant de l'antic nucli estel·lar i que no va patir el procés de neutronització) i altres elements sòlids. És una superfície sòlida. Immediatament a sota hi ha un primer mantell de protons, neutrons i electrons lliures, tots en equilibri químic. El segueix un segon mantell, més gruixut (d'uns 9 km) compost per neutrons i protons. La composició del nucli de l'estrella de neutrons és un misteri. Allà, la pressió és tan elevada que podria haver-hi neutrons en estat sòlid i, fins i tot, hi podria haver quarks lliures. Els quarks són partícules elementals i són els components dels protons i els neutrons. En condicions normals de pressió i temperatura no poden estar aïllats, sinó que estan lligats de dos en dos o de tres en tres, formant partícules més pesades. Però en les condicions extremes de les estrelles de neutrons potser podrien estar aïllats. De moment és una qüestió encara per determinar.

6.4 Estrelles molt massives ($30M_{\text{Sol}} < M < 100M_{\text{Sol}}$)

Les estrelles encara més massives tenen exactament la mateixa evolució que les que s'ha descrit d'entre 9 i 30 masses solars, però ara arriben a l'última etapa amb un nucli que té una massa superior al límit d'Oppenheimer-Volkoff. Amb aquesta massa ni tan sols la pressió de degeneració dels neutrons és capaç d'aturar el col·lapse final del nucli, que es desploma sobre si mateix formant el que es coneix com un forat negre.

Tant el límit de 30 masses solars com el límit de 100 masses solars són absolutament incerts.

6.4.1 La seva mort

6.4.1.1 Els forats negres estel·lars

Com s'ha vist, un astre amb una massa inicial superior a unes 30 masses solars, arriba a tenir un nucli de ferro que supera les 2,5 - 3 masses solars. Quan aquest nucli es col·lapse sobre si mateix, no hi ha cap força ni propietat de la matèria que pugui contrarestar aquest col·lapse i la matèria s'enfonsa sobre si mateixa, concentrant-se en un volum molt petit i aconseguint una densitat extremadament alta. Amb aquestes propietats, la velocitat d'escapament²⁰ d'aquest objecte supera la velocitat de la llum, de manera que res pot escapar d'ell. S'ha format un forat negre. Per tant, un forat negre és qualsevol objecte amb una massa extraordinària en un espai molt petit, és a dir amb una densitat altíssima, de tal manera que la seva velocitat d'escapament supera la velocitat de la llum.

Hi ha diversos tipus de forats negres coneguts, que es caracteritzen en funció de la seva massa, i cadascun d'ells es forma de manera diferent. Els que es formen de la manera que s'està explicant, són els forats negres estel·lars, ja que es formen pel col·lapse gravitatori en la fase final d'una estrella massiva.

Un cop creat el forat negre existeix una teoria físico-matemàtica molt potent que permet construir un model teòric, tant de l'exterior com de les proximitats, i fins i tot, permet conèixer detalls extraordinaris del seu interior: la Teoria General de la Relativitat. Ara bé, aquesta teoria no és capaç de descriure el comportament de

²⁰ *Velocitat d'escapament*: velocitat que ha de tenir qualsevol massa per escapar de l'atracció gravitatòria d'un astre.

la matèria a l'interior d'un forat negre. Cal una teoria més global que inclogui també la mecànica quàntica.

Encara que no es conegui amb detall què passa a l'interior d'un forat negre, se suposa que la matèria es concentra en un punt (o gairebé) del seu centre. Al voltant d'aquest punt central hi ha una zona d'exclusió, des d'on res pot sortir del forat negre. La superfície d'aquesta zona d'exclusió es coneix amb el nom d'horitzó de successos, i no és una superfície física. La distància del centre fins aquest horitzó es coneix amb el nom de radi de Schwarzschild, i el seu valor és:

$$R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

On M és la massa del forat negre, G és la constant de la gravitació universal, i c és la velocitat de la llum.

Si qualsevol partícula material o de llum travessa aquest horitzó de successos, ja no podrà sortir mai més, per això aquests objectes es diuen forats negres perquè no emeten llum, ni res més.

Hi ha un altre tipus de forats negres més fàcils de descobrir: els forats negres galàctics. Es troben al centre de totes les galàxies i les seves masses són enormes, de milions de masses solars.

6.5 Les estrelles de més de 100 masses solars

En els últims anys s'han fet descobriments molt importants en l'evolució estel·lar. En primer lloc, s'ha trobat estrelles amb masses més grans de les que es pensava que podien existir, d'entre 150 i 200 masses solars, i es creu que fins i tot n'existeixen de més grans. Aquestes s'anomenen estrelles hipergegants.

En segon lloc, s'ha estudiat un tipus de supernova que no es coneixia fins ara, les hipernoves. Es creu que aquestes són les explosions que produïrien aquestes estrelles tan massives, les hipergegants, al morir.

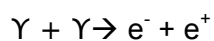
Aquestes estrelles han de tenir una evolució diferent de la que s'ha vist fins ara. S'estan començant a estudiar i encara hi ha molts dubtes sobre la seva vida i la

seva mort. En l'actualitat serien un percentatge molt petit de totes les estrelles que es formen en una galàxia, però es pensa que les primeres estrelles del Univers havien de ser així: molt massives.

Es creu que aquestes estrelles tindrien una evolució molt semblant a les estrelles més massives que s'ha vist fins ara. Naixerien d'una nebulosa i passarien a ser estrelles de la seqüència principal i seguidament travessarien les fases successives de cremat d'hidrogen, heli i carboni. Aquí l'estrella adquiriria una estructura de ceba, amb capes formades per diferents elements químics. A partir d'aquest moment l'estrella ja es comportaria d'una manera diferents al que hem vist fins ara.

Quan s'esgotés el seu carboni central, l'estrella es tornaria a col·lapsar i s'esperaria que comencés a cremar l'oxigen central, però no és així. La diferència amb les estrelles menys massives és que hauria arribat en aquesta fase amb una densitat central relativament baixa, i l'oxigen necessita més temperatura per fusionar-se. El nucli s'aniria contraient, s'escalfaria i arribaria a temperatures extraordinàries que produirien un altre procés físic: la creació de parells.

Quan la matèria s'escalfa molt emet llum molt energètica, raigs gamma, que exerceixen una pressió sobre la matèria i impedeixen que caigui de forma molt ràpida. Quan dos fotons molt energètics xoquen poden convertir-se en un parell: partícula més antipartícula, per exemple en un electró més un positró.



Quan succeeix aquest procés, la major part de l'energia dels fotons inicials queda emmagatzemada en forma de matèria. Aquí els electrons i els positrons exerceixen una pressió molt menor que els fotons, i per tant la pressió del nucli disminueix de cop, com si l'astre hagués obert una vàlvula d'escapament. Abans, la pressió impedia el col·lapse de l'estrella, però ara el nucli és inestable i comença a contreure's amb gran rapidesa.

Quan la densitat sobrepassa cert valor comença la fusió de l'oxigen, però ara no

té lloc en un nucli estel·lar estable, sinó en un nucli en contracció. El resultat és explosiu: l'energia alliberada escalfa encara més el material, i això accelera la fusió. Té lloc una reacció descontrolada en què l'estrella crema una gran quantitat d'oxigen en un temps breu, i en el què l'energia alliberada supera tota l'energia gravitatòria de l'astre.

L'estrella es destrueix per complet. Només queda un núvol de gas en ràpida expansió. S'ha produït una supernova d'instabilitat de parells o hipernova. En el seu centre no queda ni un estel de neutrons ni tan sols un forat negre, res.

6.5.1 La seva mort

6.5.1.1 Les hipernoves

Acabem de veure que les estrelles extremadament massives acaben la seva vida en forma d'enormes explosions anomenades hipernoves.

Les hipernoves tenen una corba de llum semblant a les supernoves però d'una intensitat molt superior. Si una supernova típica aconseguia una magnitud absoluta de -18, una hipernova arriba a -22. La seva pujada de llum és també molt ràpida, però la seva baixada és molt més lenta, arribant a ser de diversos anys.

Aquest tipus de fenòmens són molt estranys. Es calcula que només 1 de cada 100.000 supernoves són d'instabilitat de parells.

7. OBSERVACIÓ DE SUPERNOVES I LA SEVA FOTOMETRIA

7.1 Introducció

El treball de camp que he dut a terme es basa en una part concreta, que he explicat anteriorment en la part teòrica del treball. Com he pogut comprovar, el meu treball tracta de l'evolució estel·lar, però aquest és un tema molt extens, és a dir, podria tractar molts camps.

Com que hi ha tants temes a triar per fer un estudi pràctic, he hagut d'escollir-ne un, amb el qual centrar-me. Per això, m'he guiat per allò que m'ha cridat més l'atenció, i també per allò que tindrè més a mà a l'hora de poder portar a terme una investigació.

Les investigacions astronòmiques, generalment, investigacions d'observació, es poden fer a ull nu, amb prismàtics, amb telescopis (més o menys potents) i també amb satèl·lits, depenent del que es vulgui investigar i també dels recursos de què disposi.

Així doncs, guiant-me per tots aquests aspectes, el tema que he escollit són les supernoves. Com bé he explicat darrerament, una supernova és com mor una estrella d'unes certes característiques. Com ja sabem, aquest tipus de mort és una explosió.

He escollit les supernoves com a tema pràctic perquè vull saber com s'estudia aquest fenomen, i també perquè l'Agrupació Astronòmica de Sabadell m'ha proporcionat el material de treball per a poder investigar-les.

L'estudi de supernoves

Una supernova és un fenomen que es pot observar durant uns mesos en el cel, des del moment en què explota fins que la seva intensitat ha disminuït tant que ja no es pot apreciar.

Les supernoves, normalment s'observen en altres galaxies que no són la nostra, ja que no és un fenomen molt freqüent a causa de la llarga vida de les estrelles i és difícil apreciar-ne diverses en una mateixa galàxia. S'ha calculat, que de mitjana, en cada galàxia es produeix una supernova cada sis segles.

Si en la nostra galàxia hi hagués una supernova, es podria observar a simple vista, ja que la llum que produeix és molt intensa, i es podria arribar a comparar amb la llum que produeix la lluna. Una de les primeres supernova que es va observar a simple vista fou descoberta el 1006 per astrònoms xinesos, àrabs i europeus. Una altra supernova famosa a la nostra galàxia fou la registrada per l'astrònom xinès Yang Wei-te el 27 d'agost de 1054.

La recerca d'aquestes supernoves és una tasca complexa en què es necessiten uns mitjans tècnic elevats i uns bon coneixements d'astronomia. A més a més, per trobar una supernova s'ha d'estar en constant observació de diverses galaxies per tal de veure algun punt sospitós que es creu que abans no hi era. Avui dia, però, hi ha uns telescopis mecanitzats que estan en constant observació de diferents galaxies i que durant la nit marquen punts sospitosos. Aquests punts són comprovats per algú, ja que a vegades les màquines s'equivoquen.

Quan es detecta una supernova, se n'envien les dades a grans observatoris per a verificar-les, i un cop verificades es penjen en diverses pàgines web, on hi ha tota la informació de les últimes supernoves descobertes.

Aquestes observacions, les fan tant astrònoms professionals, com astrònoms amateurs, és a dir, aficionats.

Un cop detectada una nova supernova, es comença a fer-ne un seguiment. Aquest consisteix en mesurar la seva intensitat durant els mesos en què la podem observar i extreure'n un gràfic, on es reflecteix la seva corba de llum, i es pot veure com ha evolucionat.

Aquest és l'estudi que vull dur a terme d'una forma senzilla, ja que una investigació astronòmica sobre supernoves pot arribar a ser molt extensa i complexa.

Plantejament del meu estudi

Després d'haver acabat el curs intensiu que vaig fer durant l'estiu relacionat amb l'evolució estel·lar i les supernoves, vam poder fer una observació amb tota la gent del curs des del telescopi de l'Agrupació Astronòmica de Sabadell. Va ser en aquell moment quan vaig fer el plantejament de la meva part pràctica del treball de recerca.

Vaig poder veure com es feien les imatges de supernoves i ens van explicar com poder-les tractar després per poder calcular la seva intensitat de llum gràcies a la fotometria, i així poder fer un gràfic de la seva evolució.

En observar com anava tot, em va fascinar molt, i vaig demanar si podria fer el seguiment d'alguna supernova des de l'Observatori. Molt amablement, em van confirmar que ho podria fer, de tal forma que cada divendres a la nit que pogués, podia anar a observar amb el grup de supernoves de l'Agrupació. Aquest grup està format per cinc aficionats que es reuneixen cada divendres a les 10 de la nit, més o menys, i intenten descobrir supernoves o n'observen de ja conegudes.

Així doncs, durant uns quants divendres a la nit, he estat anant a Sabadell per poder observar i fer el seguiment de les supernoves escollides ([vegeu el meu pla de treball a Annex 5](#)).

7.2 Què es necessita per a fer una observació?

Les observacions dels astres es fan a través de prismàtics, telescopis, satèl·lits, etc. Depenen del que es vulgui observar. Però a part d'aquests instruments, n'hi ha uns altres que per a diverses investigacions són imprescindibles, com les càmeres CCD, que són aquells instrument que capturen la imatge del que es vol observar o investigar.

Per a l'observació que es vol dur a terme, és necessari l'ús d'aquesta càmera per després amb la imatge calcular la intensitat de la supernova, que s'explicarà com es fa més endavant.

L'Agrupació Astronòmica de Sabadell té un observatori molt ben equipat, em diversos telescopis i també un càmera CCD. A part d'aquests instruments que tenen a l'observatori de Sabadell, també hi ha un telescopi al Montsec que s'utilitza des de l'Agrupació amb control remot.

7.2.1 Els telescopis

Els telescopis són aparells que permeten veure els objectes de l'Univers, tot ampliant-ne la mida i la seva lluminositat aparent. Aquests sistemes òptics es basen en les lleis de l'òptica geomètrica.

Tot telescopi està format per un objectiu i un ocular. L'objectiu és la part del telescopi que capta la imatge de l'objecte que s'està enfocant en un pla; aquesta imatge és llavors ampliada per l'ocular o bé impressionada sobre una pel·lícula fotogràfica o detectada per una càmera CCD. Hi ha tres tipus de telescopis:

- 1) **Els telescopis refractors.** Tant el seu objectiu com el seu ocular són lents, i el seu funcionament es basa en la refracció de la llum (són el típics llargavistes).
- 2) **Els telescopis reflectors.** El seu objectiu és un mirall còncau (normalment parabòlic), i el seu funcionament es basa en la reflexió de la llum.
- 3) **Els telescopis catadiòptrics.** Utilitzen una combinació de lents i miralls i són els més utilitzats pels astrònoms professionals en els grans observatoris.

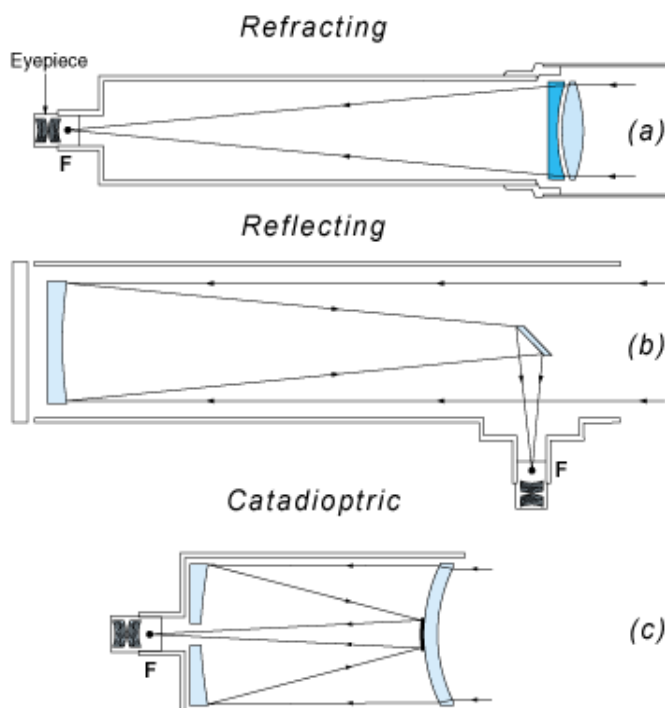


Figura 19. Esquema general del funcionament dels telescopis.

Font : <http://www.meade.com/support/telewrk.html>

L'observatori de Sabadell té, sobre la mateixa muntura, tres telescopis diferents. Un de central bastant gran i altres, més petits, al voltant.

- Telescopi de 0,5 m de diàmetre:

Aquest telescopi és el més gran, i tant pot funcionar com un de tipus refractor o un de reflector. Depenent del que es vulgui observar es farà servir d'una forma o d'una altra. Característiques:

- Focus Newton de 2m de distància focal, f/4.
- Focus Cassegrain-Relay de 7,8 m de distància focal, f/15,6.
- Mirall primari de Astro-Sitall
- Telescopi refractor de 16,2 cm de diàmetre: té una distància focal de 206 cm, f/12,7.
- Telescopi refractor de 10,2 cm de diàmetre: té una distància focal de 150 cm, f/15,3.

Aquests telescopis estan programats de forma que es puguin controlar des d'un ordinador ja que la seva muntura està informatitzada, els enfocadors són automàtics i el peu del telescopi és operable, és a dir, es controla amb control remot des de la sala d'ordinadors.



Figura 20. Telescopi de l'Agrupació Astronòmica de Sabadell.

A part d'aquest, però, l'Agrupació té un observatori al Montsec, on hi té situat un altre telescopi. Aquest observatori està situat al Prepirineu en el municipi d'Àger, Lleida, en unes instal·lacions innovadores que es beneficien de les excel·lents condicions del cel nocturn. És una zona protegida per l'ús astronòmic. Allà hi ha diferents observatoris d'altres aficionats d'arreu de Catalunya, Espanya o també de persones estrangeres. El telescopi que s'hi té situat, es controla des de Sabadell amb control remot.

És un telescopi de 0,5 metres de diàmetre amb una distància focal de 4,5 m, f/9.

Com es pot observar no és un telescopi com els que tothom té en ment, sinó que té una forma diferent. Això fa veure que no tots els telescopis són com la gent s'imagina.



Figura 21. Telescopi de l'Agrupació situat a l'observatori del Montsec.

Font:

<http://www.astrosabadell.org/ca/entitat/observatoris-al-montsec>

7.2.2 Les càmeres CCD

Als anys 90 van aparèixer les càmeres CCD que van revolucionar l'astronomia amateur. Les sigles CCD provenen de l'anglès *Charge Coupled Device*, que es pot traduir com a Dispositiu de Càrrega Acoblada.

Les càmeres CCD necessiten un temps d'integració (exposició). Significa que necessiten estar durant uns segons o minuts fent la foto, per així poder captar prou llum i generar les imatges. Això fa que no sigui un instrument amb molta resolució temporal, és a dir, no es poden captar fenòmens més ràpids que el temps d'exposició. Com que les exposicions són de l'ordre del minut, no s'espera captar, per exemple, ocultacions d'estrelles per asteroides. Per a aquesta finalitat hi ha altres tipus de detectors. El que sí que permeten els sensors CCD és captar prou senyal com per a realitzar mesures de posició (astrometria), de magnitud dels astres (fotometria), d'espectres estel·lars i moltes altres mesures.

El funcionament de les CCD es basa en el fenomen físic de l'efecte fotoelèctric, descrit per Albert Einstein l'any 1905, estudi pel qual aquest gran científic va rebre el premi Nobel de física de 1921.

L'esquema del funcionament bàsic es compon d'un sensor d'imatge (el xip CCD), un sistema de digitalització (que converteix un senyal elèctric en un número digital) i un canal de comunicació per passar la informació a l'ordinador.

Un element bàsic de les càmeres CCD són els filtres. Aquests estan incorporats a la càmera i depenent del que es vulgui observar, se n'utilitza un o altre. La seva finalitat és fer que la llum de les imatges captades amb un filtre en concret es situï en una banda de l'espectre visible, permetent estudiar un astre en bandes concretes per poder així obtenir informació física. En l'observació de supernoves, s'utilitza el filtre vermell.

La refrigeració de la càmera, abans de ser utilitzada, és una part vital, ja que la calor generada per l'anomenat efecte Joule²¹ és radiació, és a dir, llum que capta el sensor. Aquesta llum residual crea senyal anomenat soroll i malmet el sensor. Les càmeres treballen a temperatures d'entre $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ per evitar aquests efectes, gràcies a aquesta unitat de refrigeració. Tot i així, sempre hi ha senyal tèrmic romanent que s'ha d'eliminar mitjançant imatges de correcció (vegeu apartat 7.4.2.1).

A l'Agrupació, per a la presa d'imatges es disposa de dues càmeres CCD:

- CCD SBIG (Sta. Barbara Inst. Group, USA). Model: ST8XME amb xip de $13,8 \times 9,2\text{ mm}$ i 1.530×1020 píxels.
- CCD model FLI CM-9 (Finger Lake Instruments Group) amb xip de 512×512 píxels.

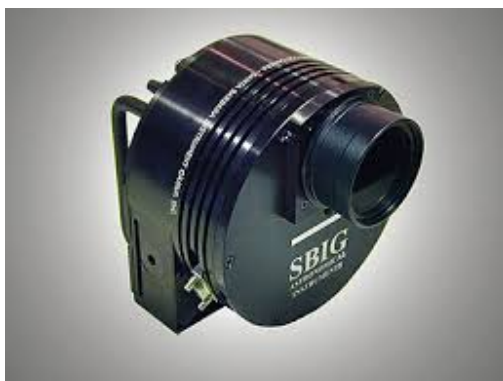


Figura 22. Càmera CCD SBIG. Model: ST-8XME.

Font:

<https://astroimagen.wordpress.com/productos/sbig/productos-descatalogados-sbig/sbig-camaras-con-ccd-de-guiado-2-ccd/st-8xme/>

²¹ *Efecte Joule*: és la manifestació tèrmica de la resistència elèctrica.

7.3 Planificació d'una observació

Per fer una observació d'un astre, s'han de preveure diverses coses abans, les quals faran efectiva o no aquesta observació.

Una de les coses més importants a tenir en compte el dia d'una observació és el temps meteorològic. Si aquest és dolent i hi ha núvols al cel, l'observació no es podrà realitzar. Així doncs, cada divendres abans d'anar a Sabadell a observar, havia de mirar la predicció del temps d'aquella mateixa nit de Sabadell a la pàgina web del servei meteorològic de Catalunya. Un membre del grup de supernoves confirmava també el temps. Per tant, depenent de la predicció, assistia o no a l'Agrupació. També va passar alguns dies que la previsió semblava bona, però un cop posats a observar, el cel es tapava, i no es podia fer cap imatge més.

Així doncs, un cop verificada la bona previsió, també s'ha de tenir en compte la lluna. La lluna és un astre que produeix molta llum, i més si és plena. Quan s'observa amb lluna plena, les imatges són molt més dolentes que no quan s'observa amb lluna nova. De tal forma que per observar, també s'havia de tenir en compte la fase de la lluna, però no era un impediment per poder observar.

També s'han de conèixer les coordenades dels astres que es volen observar, per així saber si aquell astre estarà o no a prop de la lluna, en cas que sigui plena, i també per saber si durant l'època en què es fa l'observació es pot veure o no astre. Perquè, com ja se sap, només hi ha una zona del cel que es pot veure durant tot l'any, les altres zones es veuen depenent de l'època de l'any.

Abans de saber les coordenades de l'astre que es vol observar, en aquest treball havia d'escollir les supernoves, de les quals en volia fer un seguiment. No va ser difícil, perquè amb l'ajuda del grup de supernoves, vam mirar quines s'havien detectat últimament i en vam escollir dues. Aquestes dues són:

- SN2014cy, descoberta al 31/08/2014 per Ken'ichi Nishimura. Situada a la galàxia NGC7742. És una supernova de tipus II-P.
- SN2014dg, descoberta al 11/09/2014 per Koichi Itagaki. Situada a la galàxia UGC2855. És una supernova de tipus Ia.

7.4 Observació

Un cop sabut que es pot observar i què es vol observar, es comença a treballar.

7.4.1 Preparació de l'observació

En arribar a l'observatori, abans de posar-nos a observar cal fer diverses coses:

1. Encendre els dos ordinadors necessaris. Des del primer es controla els motors del telescopi i es té obert el programa "Cartes du Ciel". Des del segon ordinador es controla la càmera i es fan les imatges.

"Cartes du Ciel" és un programa gratuït que està connectat amb el telescopi. Aquest programa conté un mapa amb la posició de tots els objectes celestes, per tant, permet buscar un astre i seguidament enviar el telescopi a les coordenades de l'astre cercat.

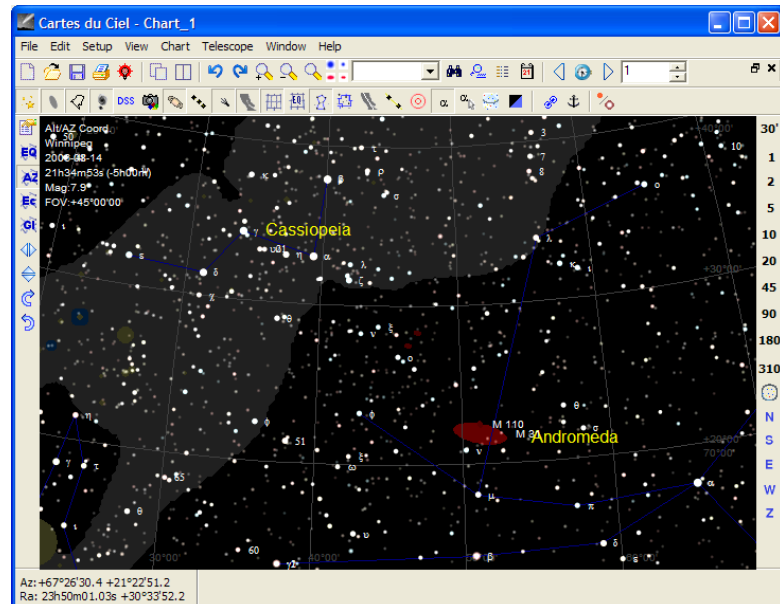


Figura 23. Programa "Cartes du Ciel"

Font:

http://en.wikipedia.org/wiki/Cartes_du_Ciel

2. Encendre els motors del telescopi i la càmera CCD.
3. Obrir el primer ordinador amb el programa "Cartes du Ciel" i els controladors del telescopi.
4. Obrir el segon ordinador amb el programa "AstroArt" amb el qual es controla la càmera CCD i es fan les fotografies.

"AstroArt" és un programa que permet capturar les imatges fetes per la càmera CCD si aquesta és compatible amb el software d'"AstroArt". Aquest programa també ens permet fer fotometria. (vegeu apartat 7.6)

5. Posteriorment, engegar el control de la càmera i triar el filtre adequat per a l'observació, en el nostre cas, el vermell. Refredar aquesta lentament perquè el possible vapor d'aigua que hi podria haver dins la càmera no es condensi i ens impedeixi fer imatges.
6. Buscar l'astre que es vol observar i enviar el telescopi a les coordenades d'aquest.

Si tot aquest procés es fa correctament ja es pot començar a prendre imatges.

En aquest pas previ a l'observació duta a terme per al treball, van sorgir certs problemes durant una de les nits d'observació. Havia entrat massa vapor d'aigua a la càmera per algun problema de tancament, de tal forma que en refredar la càmera, el refredament es va fer massa ràpid i es va condensar. Això va provocar que en les imatges es veiessin gotes d'aigua i no es pogués apreciar la supernova.

Per arreglar-ho, es va tornar a escalfar la càmera i es va esperar que marxés l'aigua creada. Aquest procés va tardar una hora, però finalment vam poder observar-la de nou.

7.4.2 Observació

Quan ja està tot a punt, podem començar a fer les imatges.

Durant cada sessió, havíem de fer les diverses imatges de les dues supernoves escollides i posteriorment se'n feien d'altres supernoves o galàxies que es volien observar.

Les imatges de les supernoves, havien de ser d'un temps d'exposició de 60 segons cada una, i es van fer unes 5 o 6 de cada supernova, per a cada observació.

Un exemple d'imatges fetes són les següents, on les supernoves estan indicades al final d'unes línies vermelles ([vegeu totes les imatges realitzades a Annex 6 i 7](#)).

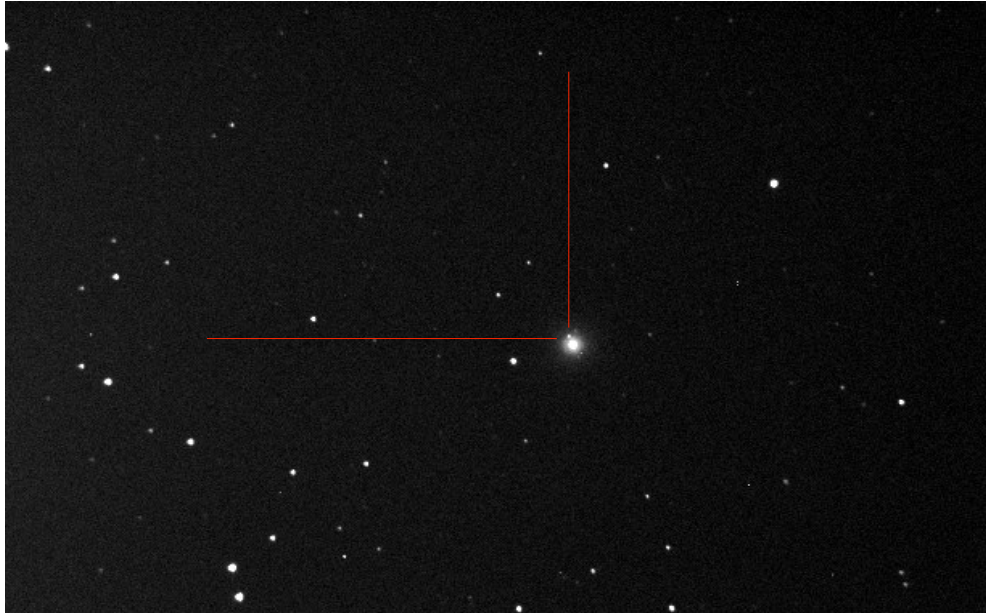


Figura 24. Supernova SN2014cy feta des del telescopi de l'Agrupació Astronòmica de Sabadell.

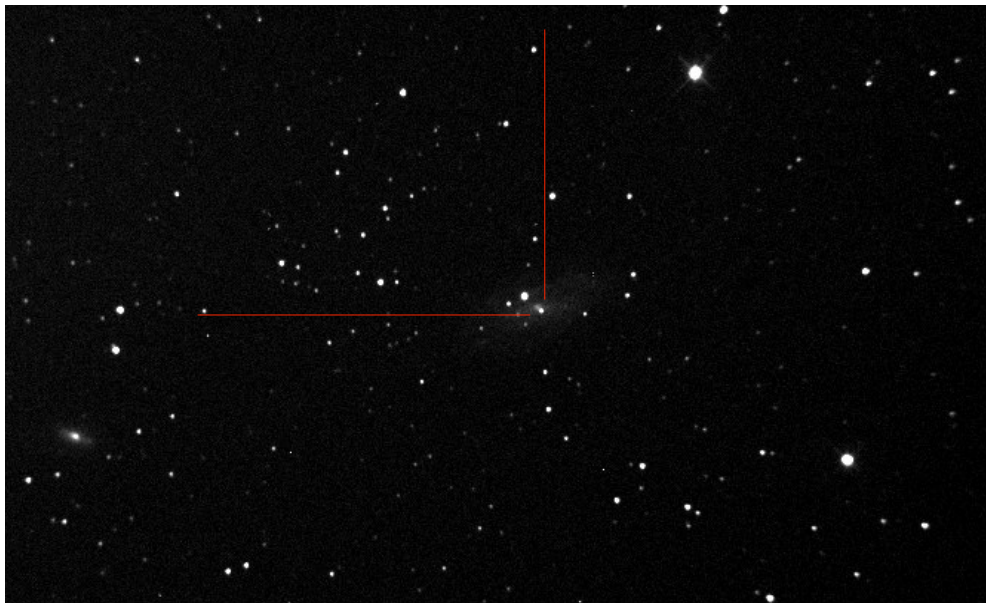


Figura 25. Supernova SN201dg feta des del telescopi de l'Agrupació Astronòmica de Sabadell.

En acabar de fer totes les imatges previstes, havia de fer les imatges de correcció. Aquestes es fan perquè els sensors CCD, en ser dispositius electrònics, constantment capten senyal que no prové, en el cas de les càmeres CCD astronòmiques, d'estels o d'astres que s'estiguin observant. Sinó que provenen del mateix sistema electrònic. És llum captada pel sensor i que cal eliminar mitjançant mètodes de correcció per tal de poder obtenir una bona imatge.

7.4.2.1 Imatges de correcció CCD

Correcció de soroll (dark frames)

El soroll és tot senyal captat pel sensor i que no prové de fonts externes de senyal, sinó del mateix sistema d'enregistrament. Es poden classificar diferents fonts de soroll, segons el fenomen físic que l'origina.

- Soroll tèrmic

És degut a la radiació tèrmica de l'electrònica de la càmera. La naturalesa dels circuits fa que succeeixi l'anomenat efecte Joule, de manera que s'emet calor: llum fonamentalment infraroja que és captada pel sensor CCD. Com major sigui la temperatura de treball de la càmera, més soroll tèrmic. Per tant, cal fer que el sensor treballi a temperatures molt baixes.

Tot i la refrigeració, però, encara hi ha soroll de radiació tèrmica, que només es pot eliminar amb les imatges de foscó o, altrament conegudes, els *dark frames*. Són imatges que eliminen la major part del soroll i que es prenen amb l'obturador de la càmera posat. És una imatge sense llum de fonts externes. Han de tenir la mateixa durada que les imatges de cel i se n'han de fer un mínim de 5 *dark frames* per a assegurar-se d'eliminar tot el soroll aleatori. D'aquest 5 *dark frames* se n'obté la mediana²² (no mitjana) dels *dark frames* obtinguts durant la sessió d'observació.

- Soroll de lectura

És el soroll creat per errors durant el procés de descàrrega dels píxels en el moment de transformar el senyal elèctric en imatge digital. En les càmeres CCD comercials també es corregeix amb les imatges de foscó (*dark frame*).

²² *Mediana*: és un terme específic d'estadística que s'utilitza per designar la dada situada al centre d'un conjunt de dades estadístiques de més petit a més gran.

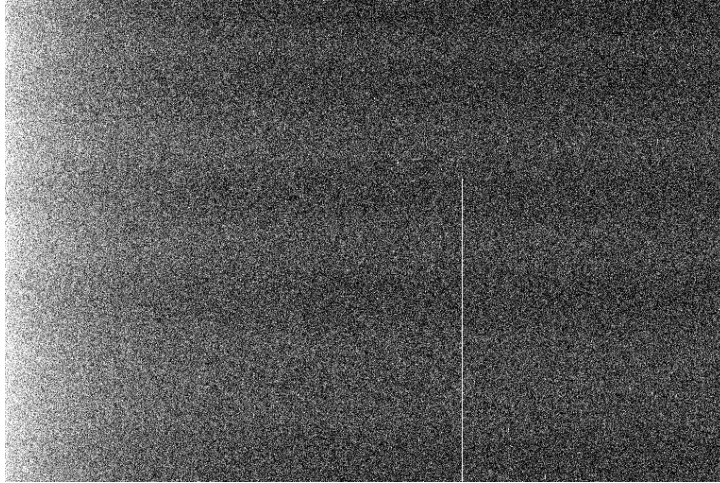


Figura 26. Dark frame.

telescopi de l'Agrupació

Correcció de sensibilitat (*flats fields*)

El metall que compona la matriu del sensor CCD ni és perfecte ni és ideal. Això fa que els píxels que en formen part no donen el mateix senyal elèctric per la mateixa intensitat lumínica.

Si volem fer mesures exactes, ens cal corregir aquestes diferències, per la qual cosa cal mesurar-les. Com que aquestes només depenen de la càmera i l'òptica podem fer una imatge d'una superfície uniformement il·luminada que ens donarà una imatge no uniforme degut a aquestes diferències: els flat fields.

La superfície uniformement il·luminada que s'utilitza a l'Agrupació és la cúpula. Aquestes imatges no depenen del temps d'exposició, seran només d'uns 5 segons d'integració, però s'hauran de fer amb el filtre utilitzat per a les imatges dels astres observats.

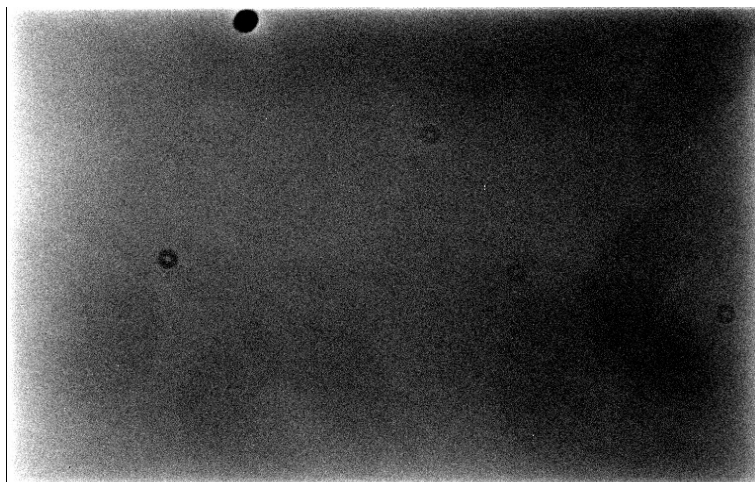


Figura 27. Flat Field.

Font: *telescopi de l'Agrupació.*

Però per ser més exactes encara, cal eliminar el corrent d'obscuritat dels *Flats*; per tant s'haurà de fer uns altres *Dark Frames* dels *Flats Fields*. Aquests seran d'un temps d'integració de 5 segons, i en farem uns 10 per poder fer la mitjana.

Això vol dir que, en acabar l'observació, s'havia de fer tres tipus d'imatges de correcció: els *Dark Frames*, els *Flats Fields* i els *Dark Frame* dels *Flats Fields*. Aquestes imatges servien per després fer el pretractament d'imatges.

7.5 Pretractament de les imatges

Una vegada acabada l'observació, calia guardar totes les imatges per al dia següent o quan es pogués, fer el pretractament de les imatges CCD i la fotometria.

Per fer el pretractament fem servir el programa "AstroArt", esmentat anteriorment. El pretractament consisteix en aplicar les imatges de correcció sobre les imatges de la supernoves.

Per fer el pretractament amb el programa "AstroArt" es col·loca cada grup d'imatges a les corresponents finestres del menú de pretractament:

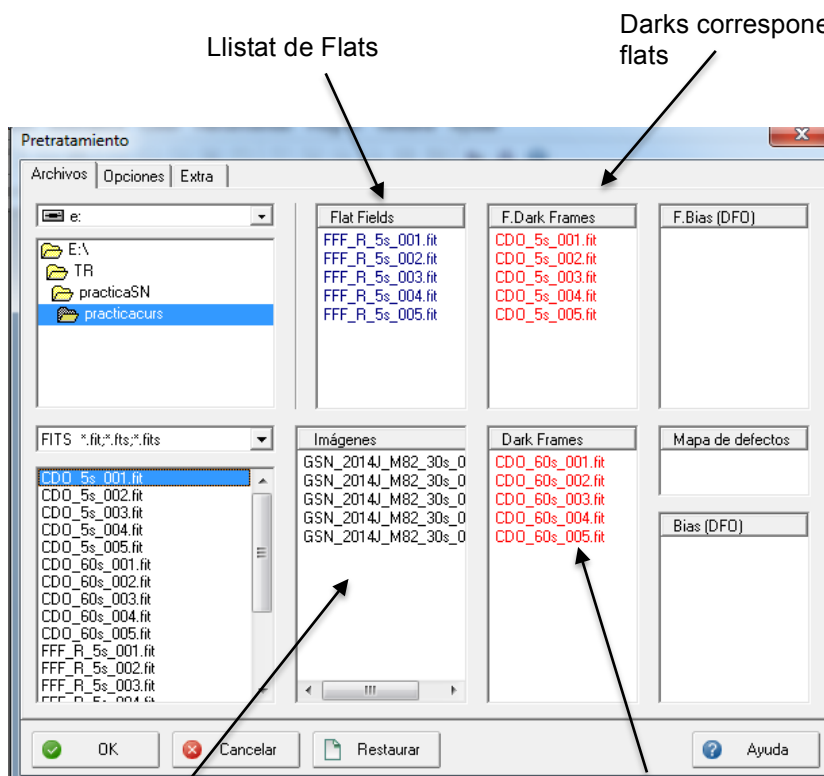


Figura 28. Finestra de pretractament, programa "AstroArt".

Font:

Selecció d'imatges de la mateixa supernova durant una observació

Darks del temps d'exposició corresponent a la imatge de l'astre

Al menú d'opcions (figura 29) s'havia de seleccionar els paràmetres:

- "Mediana" per als *darks*, *flats*...
- "Suma" a "Imagen Resultado"
- "Guardar cada imagen" a "Opciones"
- "Alineamiento automático" a "Alineamiento"

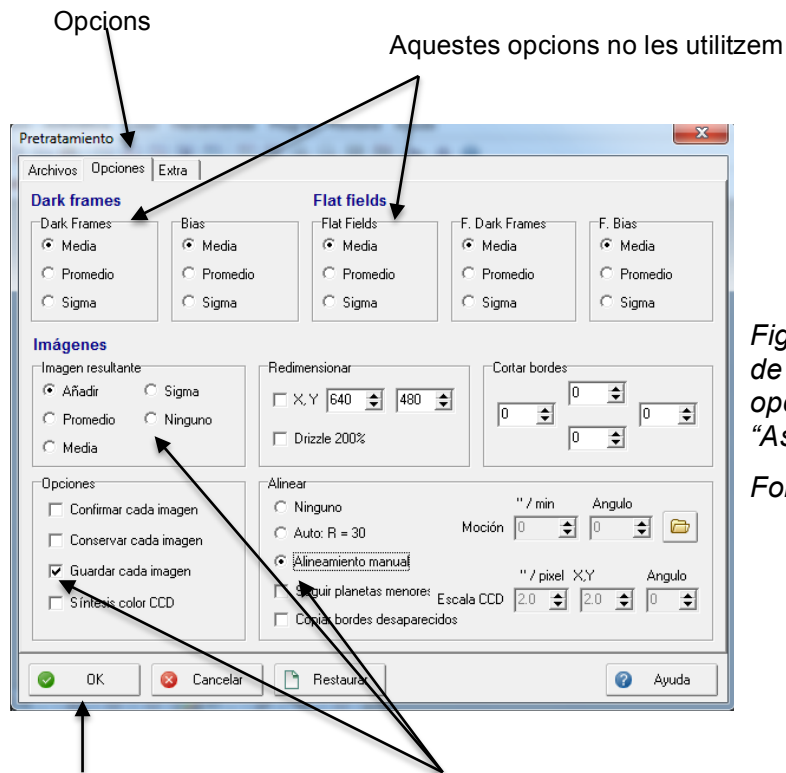


Figura 29. Finestra de pretractament, opcions. Programa "AstroArt".

Font:

Un cop seleccionades les opcions cal prémer OK

Apartats que s'han de seleccionar per continuar el procés.

Així, el programa calcula les imatges medianes de tots els *darks* i *flats* i permet alinear les imatges de la supernova, guardant una còpia de cada imatge ja "neta" i alineada. El nom del fitxer serà el mateix que la imatge original, però afegint-hi una P.

Ara doncs, a part de diverses imatges fetes en una nit d'observació d'una supernova, obtindrem cada una d'aquestes pretractada.

7.6 Fotometria

La fotometria és una tècnica basada en mesurar la llum que ens arriba dels astres, és a dir, la seva intensitat o magnitud. En aquest cas, es mesura la llum captada en les imatges de les supernoves fetes en les observacions prèvies.

Per obtenir la fotometria de les nostres observacions, s'utilitza el programa ja esmentat "AstroArt" i també un Excel on hi ha uns càlculs entrats que permeten calcular la intensitat de la supernova, és a dir la magnitud.

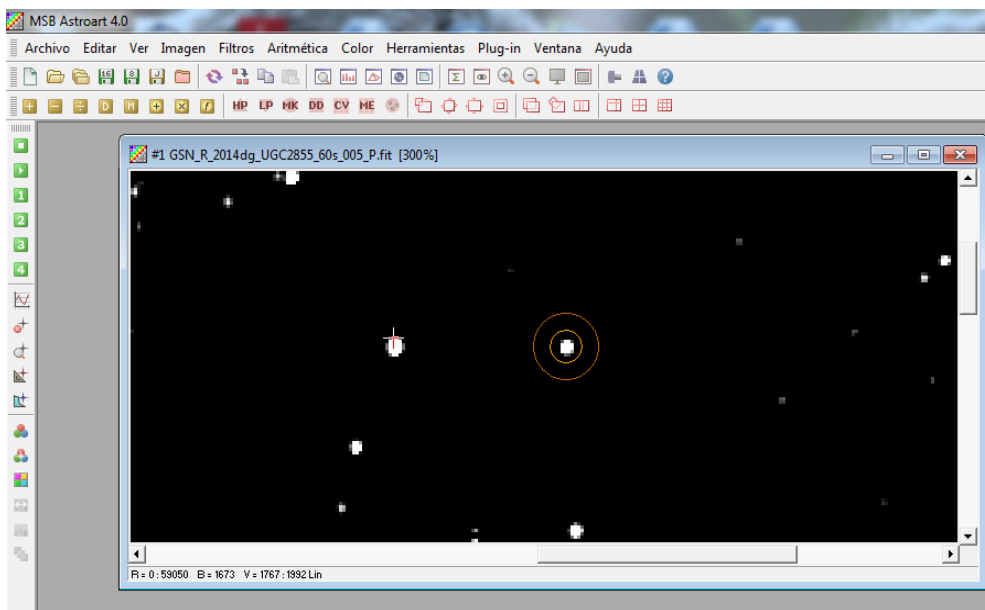


Figura 31. Visualització de la selecció d'un element celesta amb l'"AstroArt".

Font:

Avui dia, les estrelles que hi ha al cel estan catalogades, és a dir, en coneixem totes les seves característiques, com per exemple la magnitud. Estan entrades en catàlegs que es poden consultar a través d'un programa anomenat "Aladin". Així doncs, se sap la magnitud establerta de totes les estrelles.

Amb el programa "AstroArt" i un Excel podem obtenir les magnitud de les estrelles o supernoves en les imatges captades. Però aquesta magnitud segurament contindrà un error, ja sigui pel cel de la nit d'observació, com pel soroll de la càmera que no s'ha pogut tractar, etc.

7.6.1 Obtenció de la Magnitud de la supernova

- 1) Primer de tot, obrim una de les imatges pretractades amb l'"AstroArt". Un cop oberta seleccionem tres estrelles que estiguin al voltant de la supernova, i també la supernova.

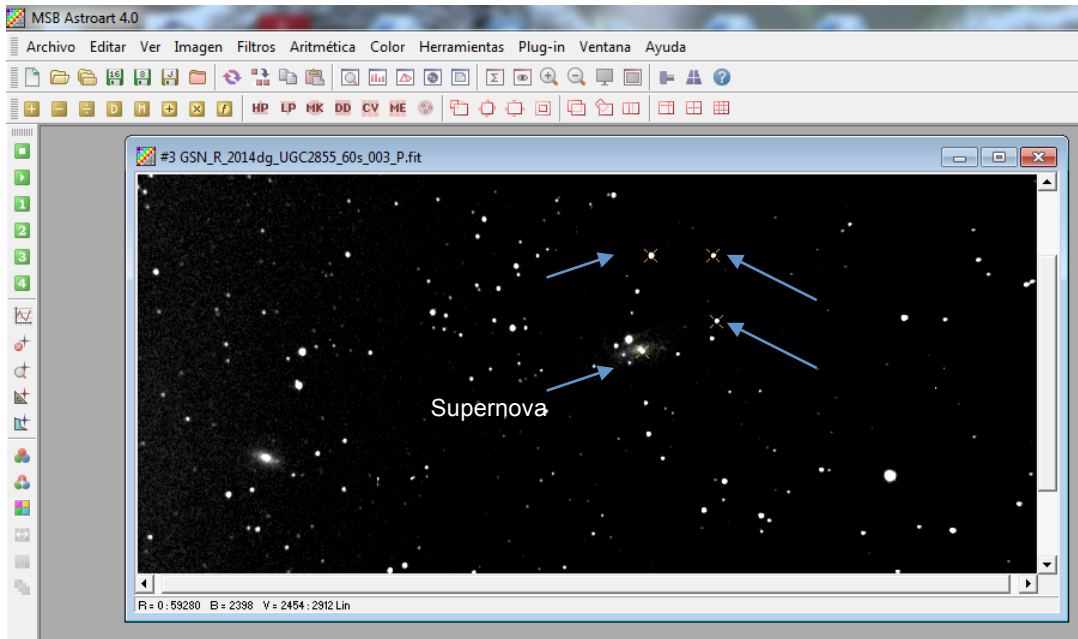


Figura 30. Exemple de selecció de diverses estrelles i de la supernova, amb els programa "AstroArt".

Font:

- 2) En seleccionar-les, el programa estableix dues circumferències circumcèntriques, l'una més gran que l'altra, al voltant dels elements seleccionats.

Primer, el programa mesura el nombre d'electrons (altrament entès com a llum) que incideixen en els píxels que conté la circumferència petita. Seguidament, es fa el mateix en l'espai entre circumferències i aquest es resta en la primera mesura, per tal d'extreure'n la llum provinent de l'Univers. El resultat que n'obtenim és el valor ADU (nombre d'electrons que incideixen en els píxels de la càmera CCD a causa de la lluminositat d'un astre).

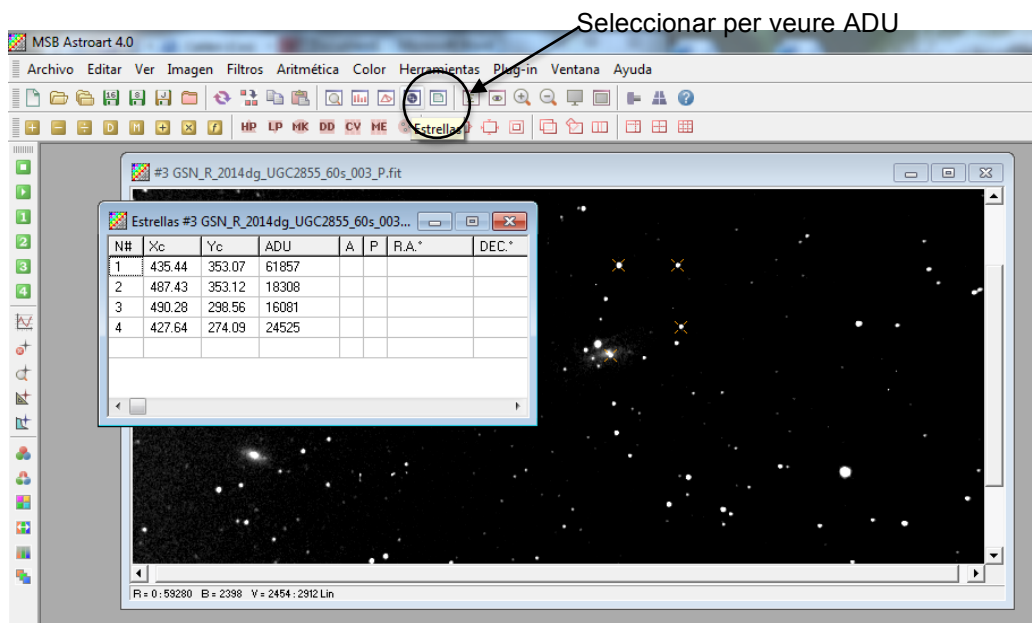


Figura 32. ADU de cada element en ordre de selecció.

Font:

3) Un cop es té l'ADU de cada estrella, s'obre un Excel que es farà servir per fer diversos càlculs amb el fi d'obtenir la magnitud de la supernova:

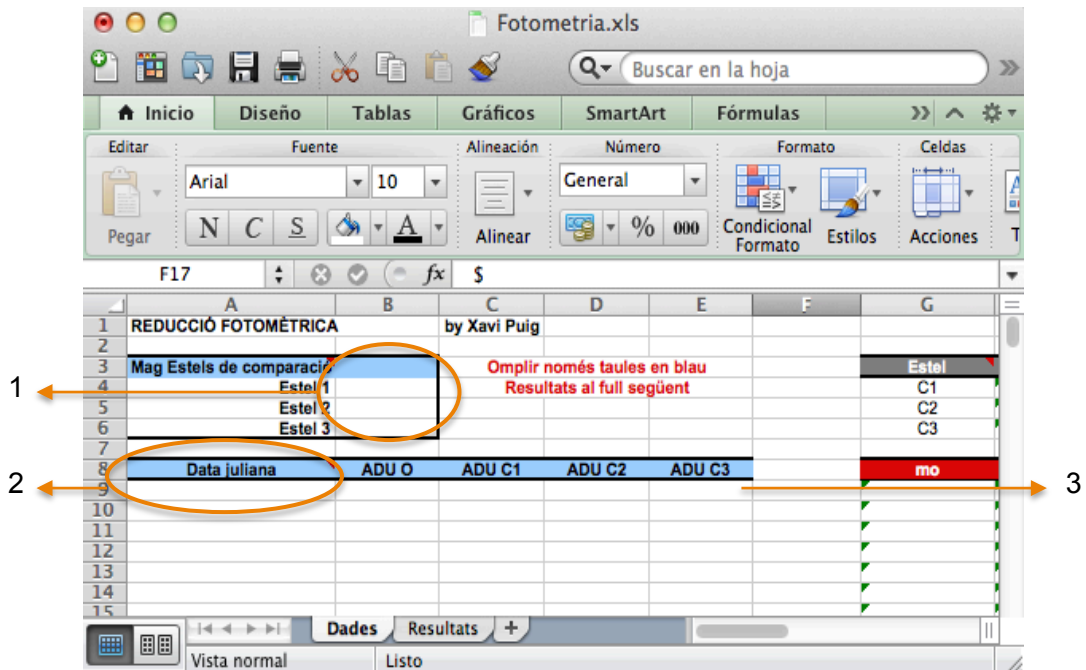


Figura 33. Model de Excel per a la fotometria d'una supernova.

Font:

- En primer lloc, s'adjunten les magnituds catalogades dels tres estels seleccionats, que es buscaran amb el programa "Aladin", de major a menor magnitud. Com que les magnituds de les estrelles funcionen inversament, el número més petit serà la que tingui la magnitud més gran.
- Seguidament, s'escriurà la data juliana²³ de la foto de la qual s'han obtingut els ADU. Aquesta data es troba al programa "AstroArt" fet servir anteriorment.
- També s'hi adjuntarà els ADU corresponents a cada estel i el de la supernova.

²³ *Data juliana*: és el nombre de dies solars comptats correlativament des de l'1 de gener de l'any 4713 aC a les 12 del migdia d'avui. Són nombres molt grans.

Tot aquest procés fins aquí, es repetirà per a cada imatge feta en una nit d'observació de la supernova corresponent. Totes les dades s'aniran entrant en el mateix Excel.

El Excel fet servir, és dissenyat per en Xavier Puig, un membre del grup de supernoves.

- 4) Aquest Excel conté una sèrie de càlculs molt complexos, que fan que un cop entrades totes les dades, es calculi la magnitud de les estrelles i la supernova a partir dels ADU de la imatge. Seguidament, calcula l'error entre les magnituds catalogades de les estrelles i les magnituds que s'han obtingut amb la nostra imatge. Aquest error s'aplica a les diverses magnituds de la supernova obtingudes a partir de les imatges, i obtindrem les magnituds reals aproximades de la supernova en aquella nit d'observació. D'aquestes magnituds, se'n fa la mitjana, i se n'obté el resultat final de la magnitud de la supernova en una determinada nit.

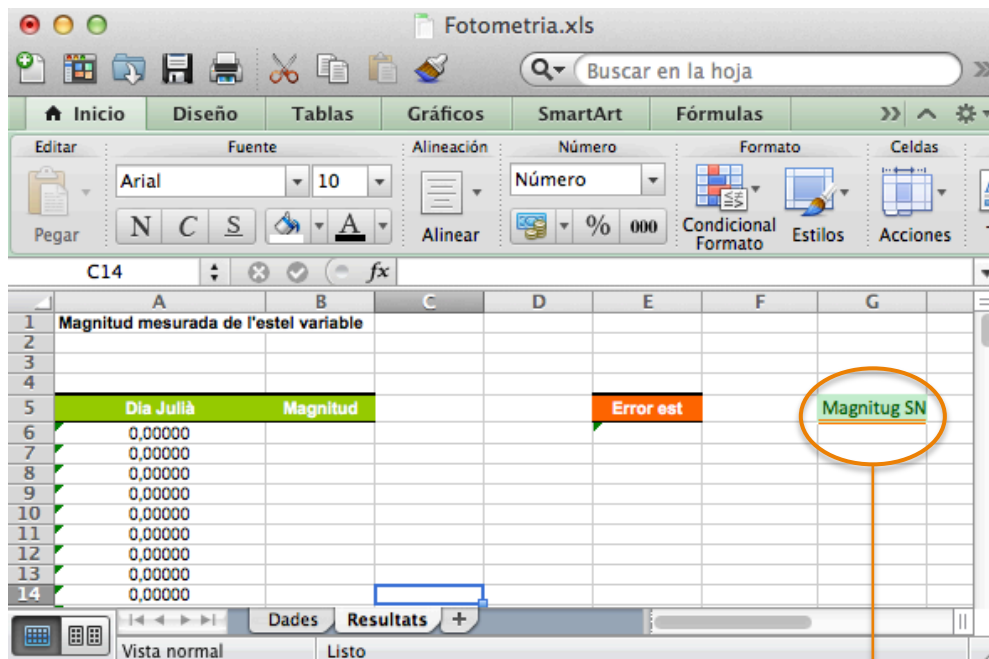


Figura 34. Model de Excel de resultats de la fotometria.

Font:

Mitjana de les magnitud de la supernova en les quals l'error ja hi estava aplicat.

Així és com s'obté la magnitud d'una supernova d'una observació. Però si volem fer un seguiment d'aquesta, aquest procés l'hauré de fer durant diversos dies

per tal d'obtenir diverses magnituds que variaran a mesura que passa el temps (vegeu totes les plantilles d'Excel utilitzades per a la fotometria a Annex 6).

Un cop obtingudes totes aquestes magnituds, es podrà fer un gràfic de l'evolució de la supernova.

En aquesta investigació en concret, he fet aquest procés amb només una de les dues supernoves escollides en un bon principi.

7.7 Resultats. Corba de llum

Un cop obtingudes totes les magnituds, es pot fer un gràfic.

En la nostra recerca, havíem d'obtenir totes les magnituds de diferents dies de dues supernoves en concret, però vam tenir problemes amb una.

Un cop fetes totes les fotografies, vam voler fer tota la fotometria, però en fer-la, ens vam adonar que la SN 2014cy estava massa a prop del nucli de la galàxia, i el programa "AstroArt" no permetia seleccionar la supernova, ja que no la detectava. Això era perquè la llum del centre de la galàxia influïa massa a la supernova, i aquesta no es distingia.

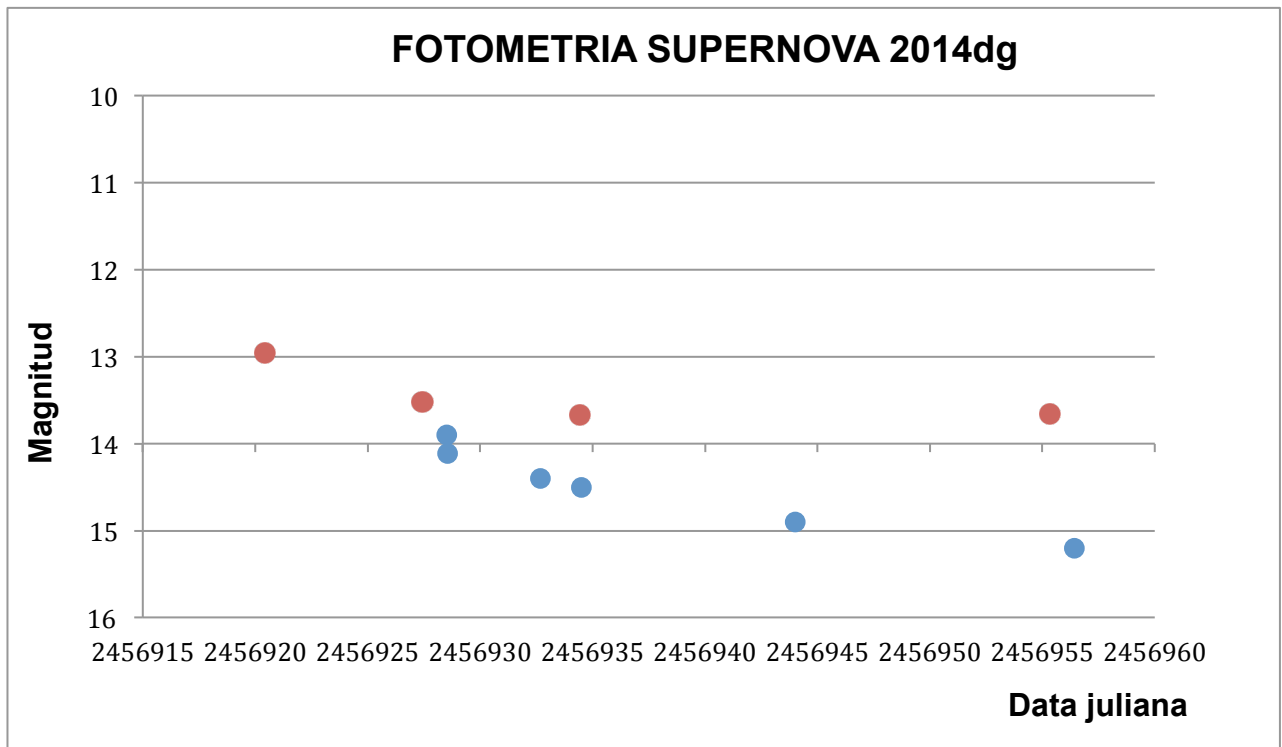
Per tant, només vam poder observar com havia evolucionat una de les dues supernoves seguides, la SN 2014dg.

D'aquesta, de set dies dels quals es van poder obtenir imatges, només van servir les imatges de quatre dies. Les imatges dels altres dies no van servir perquè a l'hora de calcular la fotometria l'error donava molt gran, a vegades l'"AstroArt" no ens detectava la supernova i no es podia seleccionar, entre altres problemes.

Només es van obtenir 4 magnituds de la SN2014dg per a construir un gràfic. Volíem continuar observant, però no hi havia més temps per fer-ho, així que vam decidir fer un gràfic amb els punt obtinguts, i també amb d'altres punts que han estat calculats per altres astrònoms i que han penjat en una web on hi ha totes les últimes supernoves descobertes i la informació d'aquestes. Aquesta pàgina web és:

<http://www.rochesterastronomy.org/supernova.html>

Gràcies al seguiment fet, s'ha pogut obtenir aquest gràfic:



En el gràfic obtingut, podem veure punts en vermell i d'altres en blau. Els punts vermells són aquelles magnituds que s'han obtingut a partir de les nostres observacions i la fotometria realitzada. Els punts blaus són magnituds calculades per altres astrònoms d'arreu del món.

La taula de dades utilitzada per a formar aquesta corba de llum és la següent:

| Data Juliana | Magnitud |
|---------------|----------|
| 2456920,42938 | 12,96 |
| 2456927,41991 | 13,52 |
| 2456934,44674 | 13,67 |
| 2456955,31911 | 13,66 |
| 2456928,51530 | 13,9 |
| 2456932,68205 | 14,4 |
| 2456928,55710 | 14,11 |
| 2456934,51530 | 14,5 |
| 2456944,01534 | 14,9 |
| 2456956,43234 | 15,2 |

Les primera data juliana correspon al 19 de setembre de 2014, i l'última al 2 de novembre de 2014.

Com podem comprovar, els resultats calculats per nosaltres són diferents dels resultats calculats per altres astrònoms. Això es deu a diverses coses. Una pot ser la presició dels instruments utilitzats, ja que molts d'aquests astrònoms hi dediquen moltes hores i tenen instruments molt sofisticats.

Una altra causa pot ser l'efecte del temps meteorològic en les observacions que pot fer variar molt el càlcul de les magnituds.

Però tot i aquestes diferències, el resultat ha estat satisfactori, ja que la intensitat de la supernova ha disminuït, com es preveia en un bon principi, i com succeeix en totes les corbes de llum de les supernoves.

8. CONCLUSIONS

Ja per concloure el treball, començaré revisant les hipòtesis i els objectius que tenia abans d'iniciar el projecte per veure si realment he complert amb els paràmetres establerts a l'inici o no. També comentaré els resultats obtinguts al final del treball.

En primer lloc, i pel que fa a la part més teòrica del treball, he pogut aprendre i comprendre bé l'evolució estel·lar, com m'havia plantejat en un bon principi. No era ben bé com creia, però en gran part la meua hipòtesi era correcte. Així doncs he après que, tot i desconeixent molts detalls del procés, totes les estrelles neixen de l'interior dels núvols moleculars, que són enormes regions de gas i pols que es troben dins de les galàxies. Aquests núvols moleculars estan estables, però en un moment concret trenquen aquest equilibri i és llavors quan, en petites porcions, el gas del núvol es va comprimint tot formant les estrelles.

Per tant, he comprovat que totes les estrelles es formen igual, però en el moment en què neixen totes adopten una sèrie de característiques diferents a les altres. Això suposarà una evolució diversa per a cada estrella depenent de les característiques adquirides.

En segon lloc, tot i saber que les estrelles evolucionen diferent, s'han pogut establir grups d'estrelles amb característiques semblants. De cada grup s'ha pogut englobar una evolució igual. La massa inicial és el criteri establert per a formar aquesta sèrie de grups.

Una estrella es forma quan hi comença a haver reaccions nuclears dins del seu nucli. Per tant, l'evolució estel·lar de cada grup es diferencia per les diverses reaccions que hi arriben a haver dins d'aquestes. En les més petites de totes n'hi ha menys que en les més grans, però les més petites viuen més temps, ja que el procés és molt més lent que en les gegants.

He pogut comprovar, doncs, que en funció d'aquestes diverses evolucions les estrelles moriran d'una forma o d'una altra. La mort de les estrelles, de més petita a més gran, respectivament, serà en forma de:

1. Nanes blanques
2. Supernoves

3. Estrelles de neutrons
4. Forats negres estel·lars
5. Hipernoves

Les morts de les estrelles, com hem comprovat, són fenòmens molt complexos i que costen d'imaginar. A mi em va cridar molt l'atenció una de les morts, les supernoves, ja que sempre n'havia sentit a parlar però mai ningú no m'havia explicat com i per què es produïen. De manera que el meu objectiu per a la part pràctica del treball ha estat investigar sobre aquestes, poder observar i fer el seguiment d'alguna supernova. Gràcies a l'Agrupació Astronòmica de Sabadell he pogut complir aquest objectiu amb gran satisfacció.

Tal com he explicat anteriorment, durant l'estiu vaig estar anant al curs de supernoves, on vaig poder aprendre tot allò relacionat amb l'evolució estel·lar. En acabar-lo vaig planificar la meva part pràctica per poder anar tot l'estiu a observar i començar el meu seguiment de les supernoves. Però l'estiu del 2014 ha estat un estiu molt dolent per a observar. No hi havia divendres que el cel no estigués tapat, així que la primera observació exitosa, la vaig poder fer el dia 19 de setembre.

A partir d'aquest dia, vaig partir de dues supernoves amb l'objectiu d'extreure'n una corba de llum de cada una. Però com bé he comentat en el treball, la fotometria d'una d'elles, la 2014dg, no va ser efectiva a causa de la seva proximitat al nucli de la seva galàxia.

La corba de llum que he obtingut en fer el seguiment de la 2014dg, no ha estat del tot la que m'esperava, perquè només he pogut obtenir la seva magnitud en 4 sessions d'observació, és a dir, 4 punts en el gràfic. N'he obtingut tan pocs per problemes meteorològics o tècnics, que han fet que les imatges no sortissin bé.

Per completar el gràfic, he consultat la magnitud calculada per altres astrònoms a internet. En completar-la podem observar que la disminució d'intensitat és més pronunciada en els punts calculats per altres astrònoms que no els meus. Això és degut a l'alta presició que tenen els instruments d'aquests astrònoms professionals o aficionats.

Pel que fa a la meva hipòtesi, és correcta, ja que la magnitud de la supernova a mesura que transcorre el temps va disminuint, i arribarà un punt en què aquesta intensitat serà tan feble que ja no podrem apreciar la supernova al cel.

9. VISIÓ PERSONAL

Aquest treball m'ha servit per adonar-me de la complexitat i la immensitat del nostre Univers, però també per aprendre moltes coses del camp de l'astronomia.

He comprès que la vida de la gent aficionada a l'astronomia no és només agafar un telescopi i observar per ell durant una estona. Sinó que es basa en hores i hores d'observació amb instruments i tècniques molt complexes.

Amb el treball de camp realitzat durant els mesos de setembre, octubre i novembre, he pogut aprendre a fer servir algunes d'aquestes tècniques que utilitzen els astrònoms per obtenir informació sobre els astres, com la fotometria i sobretot l'observació.

Ha estat molt satisfactori per a mi poder passar totes aquestes hores amb un grup de gent que comparteixen una mateixa afició, i que no tenen cap problema en estar-se fins les 4 de la matinada observant, tot el contrari, els hi encanta.

Deixant de banda tots els problemes que han sorgit durant la meva investigació, estic satisfeta amb el resultat. Des del meu punt de vista, he complert tots els objectius proposats, i a més a més he après coses que potser mai hagués après gràcies a la realització d'aquest treball, fins i tot, l'astronomia ha arribat a ser per mi una afició, que m'agradaria continuar al llarg de la meva vida.

Abans de començar tot aquest treball, tenia una visió del cel molt diferent a la d'ara. Ningú es pot arribar a imaginar lo petits que arribem a ser en aquest Univers tan gran. No ens n'adonem, però fora de la Terra, succeeixen mil coses inimaginables i fins i tot inexplicables, però que realment són espectaculars.

L'astronomia és un camp molt poc conegut a nivell global, i crec que tothom hauria de tenir una idea d'on estem i perquè hi estem. Així que proposo a tothom a qui aquest treball l'hi hagi plantejat mil preguntes, que investigui i trobi la forma de poder observar per ell mateix tots aquests fenòmens, perquè és molt diferent veure-ho en imatges d'internet o en aquest treball mateix, que no poder dir que has estat tu qui ha fet aquella fotografia, o que has estat tu amb el teu propi telescopi qui ha observat la lluna, el Sol o qualsevol altre astre.

Espero que aquest treball hagi complert tots els paràmetres establerts a l'inici del projecte i que hagi agradat i motivat a la gent per a poder obrir els ulls a un món enorme ple de preguntes sense respondre encara.

10. FONTS D'INFORMACIÓ

Durant el llarg del treball la major part d'informació ha estat extreta de les classes que es van fer a l'estiu en el curset emprat. A part però, s'ha utilitzat algun recurs bibliogràfic i electrònic.

Bibliografia:

- D. GALADI, J. GUTIÉRREZ. *Astronomía General*. Barcelona: Omega, 2001.

Recursos electrònics:

- WALES, Jimmy. *Fotometría* <http://es.wikipedia.org/wiki/Fotometr%C3%ADa>
- NAVES, Ramon. *Astrometría de cometas y asteroides*.
<http://www.astrosurf.com/cometas/conferen/conferencia.html>
- ESTELLÉS, Vicent Andrés. *Espectres d'absorció i d'emissió*.
<http://www.edu365.cat/batxillerat/ciencies/taula/espectros/spespectro.html>
- BERENGUER, Xavier. *Espectrografia*.
<http://www.nostranau.net/espectrografia>
- WODPRESS, *El meu món*. <http://cat.bloctum.com/fletxa/page/4/>
- POWELL, Richard. *El diagrama Hertzsprung-Russell*.
<http://www.atlasoftheuniverse.com/catala/hr.html>
- WORDPRESS. *De las estrellas y constelaciones*.
<http://astrobloguers.org/2009/01/de-las-estrellas-y-constelaciones/>
- ASTROBLOGGERS. *Astronomia (2)*. <http://astronomia-fisica-misiones-espaciales.blogspot.com.es/p/astronomia-2.html>
- GRUP D'INVESTIGADORS DE HARVARD. *Observatorio virtual*.
<http://atenea.pntic.mec.es/antares/obser0/07clasifestelar/p70.html#diagrama>
- WALES, Jimmy. *Convecció* <http://ca.wikipedia.org/wiki/Convecci%C3%B3>
- GENERALITAT DE CATALUNYA. *Univers*
<http://www.xtec.cat/~rmolins1/univers/cat/formov00.htm>
- WALES, Jimmy. *Evolució estel·lar*.
http://ca.wikipedia.org/wiki/Evoluci%C3%B3_estel%C2%B7lar
- AGRUPACIÓ ASTRONÒMICA DE BARCELONA. *Qui som i què fem a supernoves*. <http://www.aster.org/ca/seccions/supernovas.html>

- E. CARRASCO, A. CARRAMIÑANA. *Supernova: Cuando las estrellas explotan*. <http://www.inaoep.mx/~rincon/supernova.html>
- BBC News. *Supernova produces cosmic rays*
<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/3981619.stm>
- IAU. *List of Supernovae*
<http://www.cbat.eps.harvard.edu/lists/Supernovae.html>
- TENAGRA OBSERVATORY,
<http://www.rochesterastronomy.org/supernova.html>
- BLOGGERS. *La vida de una estrella*.
<http://www.portalplanetasedna.com.ar/estrellas.htm>
- MEADE'S SALES TEAM. Types of Telescopes
<http://www.meade.com/support/telewrk.html>
- WORDPRESS. *ST-8XME*
<https://astroimagen.wordpress.com/productos/sbig/productos-descatalogados-sbig/sbig-camaras-con-ccd-de-guiado-2-ccd/st-8xme/>
- AGRUPACIÓ ASTRONÒMICA DE SABADELL. *Observatoris*.
<http://www.astrosabadell.org/ca/l-entitat/observatoris-al-montsec>