

## ASTRONOMIA

### **INTRODUCCIÓ AL FENÒMEN DE LES SUPERNOVES**

*Antoni Petit i Deulofeu*

#### **RESUMEN**

La supernova es el colapso repentino y catastrófico de una estrella masiva, que corresponde a la última etapa de su evolución. De las observaciones reunidas hasta la fecha se ha deducido que, en promedio, se produce una explosión de supernova cada 30 años, emitiendo la misma energía que el Sol durante toda su vida

KEY WORDS: *Stellar explosion, shock wave, supernova remnant, white dwarf, gravitational energy*

#### **1. LA FI D'UN ESTEL MASSIU**

La majoria dels estels brillen amb regularitat mentre ells estan en equilibri perfecte entre la gravetat que contrau l'estel i la calor interna que el dilata. Si una d'aquestes forces pren avantatge, l'estel esdevé inestable i llur lluminositat sofrirà modificacions. Així la durada de la vida d'un estel dependrà en gran part de la seva massa. Ja que els estels massius es formen ràpidament – algunes centenes de milers d'anys a penes – i per tant llur vida és relativament breu, respecte als estels de massa menor. Per exemple, un estel 8 vegades més massiu que el nostre Sol, brillarà durant uns 40 milions d'anys i en canvi el Sol té una vida d'uns 10.000 milions d'anys.

L'estructura i evolució dels estels estan íntimament lligades. L'estructura està dictada per l'exigència permanent de l'equilibri mecànic: L'estel està a cavall entre el vol i la caiguda. Cada punt de la seva matèria està atret cap llur centre i a la vegada repulsat per la pressió que origina el seu procés termonuclear evolutiu. La història d'aquests tipus d'estels és una lluita sens perdó entre el foc nuclear i la gravitació: la potència contra la tenacitat. L'esfondrament gravitacional del nucli d'un estel massiu a la fi de la seva vida, es desencadena quan les reaccions nuclears ja no produeixen més energia.

Una fita astronòmica important esdevingué el febrer del 1987. Fou l'esdeveniment del segle, per primera vegada es va poder estudiar a fons l'explosió d'un estel massiu, amb mitjans tecnològics moderns. Aquest estel situat en el Gran Núvol de Magallanes, que com se sap és una galàxia satèl·lit de la nostra Via Làctia situada a

uns 170.000 anys llum. La (S-1987-A) que és el nom donat a la primera supernova<sup>1</sup> d'aquell any, va ser visible a simple vista amb una magnitud de 2,4.

Estadi	Temperatura 10 <sup>7</sup> °K	Densitat (g/cm <sup>3</sup> )	Durada de l'operació.
Fusió de l'Hidrogen	9	5	7 milions d'anys
Fusió de l'Heli	20	700	500.000 anys
Fusió del Carboni	80	200.000	600 anys
Fusió del Neon	150	4 milions	1 any
Fusió de l'Oxigen	200	10 <sup>7</sup>	6 mesos
Fusió del Silici	350	3 · 10 <sup>7</sup>	1 dia
Esfondrament del nucli	700	3 · 10 <sup>9</sup>	1 segon
Rebot	3000	10 <sup>14</sup>	10 milisegons
Explosió	De 100 a 600	variable	0,01 a 10 segons

Taula 1. Estadis evolutius d'un estel massiu.-

Entre els estels més propers, Betelgeuse de la constel·lació d'Orió, és l'única que podria engendrar una supernova. Però de moment la nostra veïna seguirà gaudint d'una bona salut per alguns mil·lennis. Si la distància que ens separa d'aquesta hipotètica supernova fos solament de 20 anys llum, el bombardeig de raigs X, còsmics i ultraviolada no deixaria en aquest punt de l'Univers cap vestigi de vida. A 50 anys llum, les mateixes radiacions destruirien la capa d'ozó que protegeix la nostra Terra. Afortunadament Betelgeuse està a una distància de 650 anys llum i el que veurien els habitants del nostre planeta al cap d'una vintena d'anys després de l'explosió, unes quantes setmanes amb nits molt clares, i el seu fulgor seguiria essent visible a ple dia. I en el seu lloc quedaria un núvol brillant de pols i gas, amb una estel de neutrons en el centre, el nucli superdens de l'estel mort.

## 2. EL PRELUDI D'UNA SUPERNOVA

### 13·10<sup>6</sup> anys abans

Temperatura: 30·10<sup>6</sup> °K. Un estel massiu es contrau sota la força de la gravetat. En llur nucli l'hidrogen (H) es transforma en heli (He). L'estel està estratificat en capes com una ceba, on la capa més externa és l'Hidrogen. (H --> He)

1. El terme "Supernova" és una derivació de la paraula llatina *nova* utilitzada pels astrònoms Tycho Brahé i Joanes Kepler en el 1600, que en llurs escrits llatins utilitzaven el terme *stella nova* per indicar els nous astres d'aparició temporal. La paraula "Supernova" fou utilitzada per primera vegada pel físic Walter Baade en 1933, durant el Congrés anual d'una Societat americana de Física.

### 1 milió d'anys abans

Temperatura:  $150 \cdot 10^6$  K. El nucli format per He es contrau encara més. A continuació l'He es fusiona formant carboni C. (He  $\rightarrow$  C)

### 6000 anys abans

Temperatura:  $620 \cdot 10^6$  K. El nucli es contrau encara més. La fusió primitiva es manté activa, però el carboni es fusiona formant neó (Ne).

### 7 anys abans

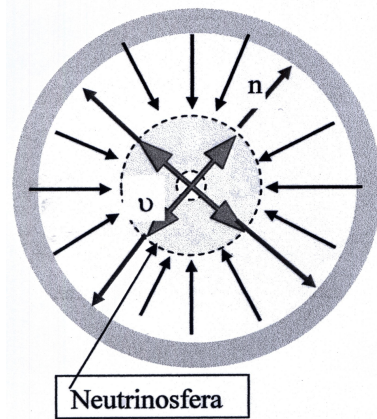
Temperatura:  $1300 \cdot 10^6$  -  $1900 \cdot 10^6$  K. A aquesta temperatura el Ne comença a reaccionar formant oxigen (O) i l'oxigen comença a fusionar-se formant Silici (Si)

### 3 dies abans

Temperatura:  $3000 \cdot 10^6$  K. El nucli es contrau i el silici es fusiona formant ferro (Fe). però el ferro és molt estable i li costa fusionar-se, ja que necessita consumir molta energia. Simultàniament un front de xoc de neutrins ( $\bar{\nu}_i$ ) es genera durant la neutronització del nucli compacte. (Neutrins =  $\bar{\nu}_i$ )

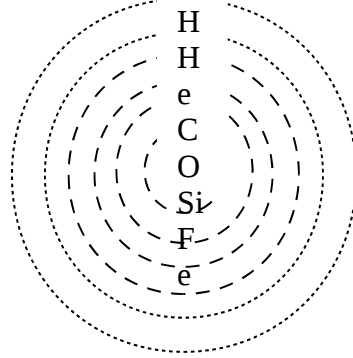
### 200 milisegons abans

Inici de l'explosió. El col·lapse es produeix a un 25% de la velocitat de la llum, el nucli es contrau (des d'una esfera de 6000 Km. a una de 10 Km.). Es l'anomenat *Màxim cruixit*. La matèria estel·lar es trenca en protons, neutrons i electrons, els quals són comprimits fins tenir la densitat d'un nucli atòmic.



### Un segon després de l'explosió

A l'interior el nucli "rebota" degut a l'implosió i es converteix en una esfera d'uns 25 Km, adquirint una densitat de  $270 \cdot 10^6$  kg/cm<sup>3</sup>. Finalment l'esfera de neutrins xoca contra l'envoltura i transmet llur moment expulsant les capes i produint l'explosió de la Supernova. L'ona de xoc originada es desplaça a una velocitat de 20.000 Km/s.

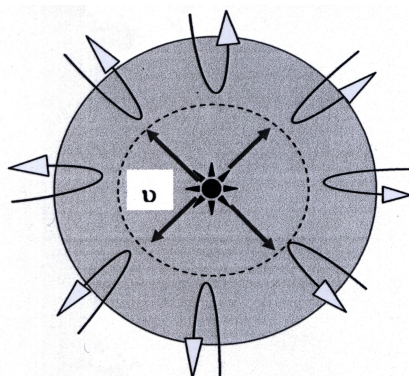


Simultàniament un front de xoc de neutrins es genera durant la neutronització del nucli compacte. ( $n$  = neutrons,  $\bar{\nu}_e$  = neutrins)

Els processos de fotodesintegració i de captura d'electrons acceleren encara més l'enfonsament de l'estel, i a més ara també la pressió de degeneració perd força ràpidament.

Protons + electrons  $\rightarrow$  neutrons + neutrins

### Una hora després de l'explosió



L'ona de xoc assoleix les capes externes de l'estel, desencadenant el primer flaix lluminós de la Supernova. La ona de xoc es dissemina per l'espai perdent llur forma degut a la asimetria de l'explosió. En el centre quedarà un estel de neutrons; envoltada de pols i gas en expansió, que romandrà visible durant segles. Finalment, la neutrinosfera xoca contra l'envolvent i transmet llur moment expulsant les capes i produint l'explosió de supernova.

L'energia desenvolupada per una supernova de tipus II és d'uns  $10^{46}$  joules ( $\sim 100$  foe), emesos durant els 10 segons del flux explosiu de neutrins. De tota aquesta energia entre 0.01 i 1 foies s'emet en forma lluminosa, que és l'energia que veiem òpticament nosaltres.

### 3. MANUFACTURES I CENTRES DE CREACIÓ DELS NUCLIS DELS ÀTOMS

Els estudis teòrics confirmen que les Supernoves representen la vertadera font de la majoria dels elements pesants de massa atòmica, superiors al nombre atòmic ( $N_A=16$ ). Així la nucleosíntesi explosiva completa la llista d'espècies disponibles entre els elements del grup del ferro: des de l'Escandi al Coure; produïts dins l'infern de l'explosió per reaccions entre partícules carregades (nuclis d'àtoms, partícules, protons, ...), i també els nuclis d'elements més pesants, tals com Europi, Tori, Urani, Plutoni, ... per la captura ràpida de neutrons.

A fins il·lustratiu prenem el cas de la SN 1987A del tipus II. La qual se singularitza per ser la més brillant d'aquella època. L'ur massava era de  $20 M_{\odot}$ , i que a la fi dels càlculs es va repartir en la forma següent:

---

 $2 M_{\odot}$  = masses solars

Hidrogen:	12 Ms + 2 Ms perdudes sota la forma de vent estel·lar
Heli:	2,1 Ms
Carboni 12:	0,114 Ms
Oxigen 16:	1,48 Ms
Neó 20:	0.229 Ms
Magnesi 24:	0,147 Ms
Silici 28:	0,147 Ms
Ferro 56:	0,07 Ms

Comparant la composició química de la matèria ejectada amb la del Sistema Solar un es pot convèncer que la Supernova del tipus II es la font major dels elements més complexos a partir de l'oxigen. Ja que de fet les quantitats de matèria ejectada depèn de la massa inicial dels estels. Els estels massius són les més generoses, però també les més rares: llur feble nombre queda compensat per llur generositat. Els bonics estels blaus, excepcionalment calents i massius, juguen en la economia general de l'Univers un rol manufacturer essencial.

El ferro és un cas particular, ja que ell és produït d'una manera copiosa en les Supernoves de tipus I i en menor mesura per les del tipus II. Les que són de tipus I són el resultat explosiu d'una "*nana blanca*" massiva i d'un company estel·lar que s'empassa una part de llur matèria (és el cas d'un sistema binari). A la llarga la "*nana*" s'esfondrà sota el seu propi pes, però no sense provocar una combustió explosiva del *carboni*. L'ona provocada per la deflagració, incinerarà la part central de l'estel, deixant-la a l'estat de cendra. En aquest procés una part del Niquel-56 es transforma en Cobalt-56 i després en Ferro-56.

L'energia radioactiva fa brillar l'evolvent ejectat en un esclat intents, que declina exponencialment al ritme de la transmutació de Cobalt en Ferro. (Duració 113 dies).

El tipus de residu que produirà un estel depèn de nou, de la massa inicial d'aquest i de la forma que ha perdut llur massa. La teoria prediu que fins a 25 masses solars (Ms) el residu serà un "estel de neutrons" d'unes 2 Ms. Per sobre d'aquesta cota es produiran solament "forats negres".

Hi ha una excepció: quan es tracta d'un estel amb 50 Ms que es troba en la fase Wolf-Rayet, es podria haver perdut tanta massa durant el seu procés evolutiu normal, que el residu acabaria convertit en un estel de neutrons.

#### 4. CLASSIFICACIÓ ESPECTRAL

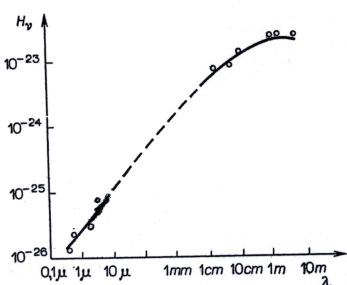
Històricament les Supernoves han estat classificades en funció de les línies d'absorció dels diferents elements químics que apareixen en els seus espectres.

<b>Tipus I</b>	Sense línies de Balmer de l'Hidrogen.
<b>Tipus Ia</b>	L'espectre mostra la presència de Silici (línia Si II a 615 nm)
<b>Tipus Ib</b>	Presència d'heli (He I a 587,6 nm)
<b>Tipus Ic</b>	Sense heli o amb poca quantitat.
<b>Tipus II</b>	L'espectre conté Hidrogen (estels gegants lluminoses)
<b>Tipus II - P</b>	L'He domina sobre l'H. La corba de llum mostra una part plana.
<b>Tipus II - L</b>	La corba de llum decreix linealment després d'un màxim.

Taula 2. Classificació espectral de les supernoves.

La matèria expulsada per una Supernova s'estén per l'espai, formant un tipus de nebulosa anomenada : Romanent o Residu de la Supernova. La durada de vida d'aquest tipus de nebulosa és relativament limitat. La matèria està ejectada a gran velocitat (a milers de Km. per segon). El romanent es dissipa a escala astronòmica en algunes centenes de milers d'anys. La nebulosa del Cranc és un exemple d'un romanent jove : l'esclat de l'explosió va arribar a la Terra farà uns mil anys.

Les supernoves contribueixen a l'enriquiment del medi estel·lar principalment amb metalls. Així darrera cada generació d'estels, la proporció en elements pesants augmenta. Una major metal·licitat comporta una major probabilitat de formació de planetes i també contribueix per formar estels de menors dimensions, com el nostre Sol.



Els punts marquen els resultats experimentals de les observacions.

#### Estudi de la Nebulosa del Cranc (SN – 1054)

Està situada en la Constel·lació del Brau, és del tipus I i de Magnitud 9. A estat una de les més estudiades. Per interpretar les radiacions d'aquesta nebulosa s'ha hagut de recórrer al seu origen de radiació de sincrotró.

Efectivament llur espectre continu en el domini visible i en el domini de radio han provat llur origen sincrotrònic. L'ur massa seria d'unes 20 Ms (Masses solars). En la figura adjunta se

representa l'espectre de la SN-1054. (1054 és l'any de la seva aparició).

La brillantor en el domini de radio a *grosso modo* es pot considerar que els electrons tenen una energia que depassa la quantitat:

$$E_1 = m \cdot c^2 (2 \pi m \cdot c \cdot v / e \cdot H)^2 \sim 10^9 \text{ eV}$$

Les causes de l'aparició en la (SN-1054) dels electrons relativistes presenta un gran interès. I cal prendre en consideració que la durada de vida dels tals electrons no és pas molt llarga. En particular, una fracció important de llur energia es debilitada per llur desplaçament dins el propi camp magnètic.

La freqüència característica corresponent al màxim de l'espectre d'emissió val en "ergs".

$$E_0 \sim 10^{11} \text{ eV (elèctron Volts)}$$

( $E_0$  = Energia inicial de l'electró pel temps  $t=0$ )

( $H \sim 10^{-4}$  ergs)

Essent  $A = 0,0024$  (Valor de la Constant A, si E està experimentat en ergs)

El temps desenvolupat serà:

$$E = \frac{E_0}{1 + A \cdot H^2 \cdot E_0 \cdot t} \quad t_1 = \frac{1}{A \cdot H^2 \cdot E_0} = 10^4 \text{ anys}$$

Que seria la durada de vida del residu visual de la SN-1054.

Naturalment cal tenir en compte que els electrons poden també perdre llur energia per altres vies, per exemple : per ionització. La lluminositat dels filaments que mostra la nebulosa, degut a la radiació ultraviolada de la part amorfa, o també per l'escalfament que causen les col·lisions amb partícules del medi interestel·lar .

Realment en general se suposa que la massa total entre la part amorfa i la filamentosa serà de l'ordre d'unes 0,2 Masses solars. També cal tenir en consideració que les explosions de supernova del tipus II són encara més grans que les del tipus I. I en aquest cas les masses ejectives serien de l'ordre de 1 a 2 Masses solars.

Fa una cinquantena d'anys que els tipus de supernova es determinaven per les corbes de llum i ha partir dels elements químics que presentaven els astres. Ha estat més tard que els astrofísics s'han adonat que aquest tipus de fenòmens físics els hi corresponen totalment.

Una “nana blanca” en un sistema binari, residu ella d’un estel semblant al nostre Sol, absorbeix la matèria del seu company. A l’engrossir-se ella esdevé inestable i llur contracció desencadena l’explosió del conjunt. Després del cataclisme ja no resta res. Es la supernova del tipus “Ia”.

Un estel massiu, havent ja consumit llur combustible nuclear, implosa (explota cap a dins) en una fracció de segon; després “rebota” sobre el seu nucli de ferro, el qual esdevé ja incompressible i per tant explota ejectant llurs capes externes. El nucli es transforma en un estel de neutrons o en un forat negre si llur massa:  $M_{II} > 20 M_{\odot}$ . Es la Supernova del Tipus II.

En la següent figura mostrem el residu d’un estel massiu que va explotar com supernova en 1987 en el Gran Núvol de Magallanes.

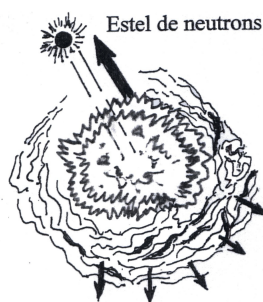
Segons les estadístiques corresponen dues supernoves per segle en la nostra Via Làctia. L’última observada és la de Kepler en 1604. Fora de la nostra galàxia l’última explosió estel·lar visible a l’ull nus, fou la del Gran Núvol en 1987.

En el nostre entorn les candidates possibles visibles a l’ull nus serien, Betelgeuse, Antares i la ( $\rho$ ) de Casiopea.

## 5. L'EFFECTE COET DE LA SUPERNOVA

Resulta desconcertant l’alta velocitat en que es mouen els estels de neutrons per la galàxia. Els nous models de supernoves detectades, de nucli que col·lapsa ofereixen una explicació basada en la asimetria intrínseca d’aquestes explosions.

Les simulacions multidimensionals mostren que el plasma de la capa escalfada pels neutrins al voltant del nucli interior de la supernova desenvolupa bombolles flotants i pinacles en forma de bolet. La convecció transporta l’energia a l’ona de xoc, que l’impel·leix cap a fora i desencadena l’explosió.



Les forces internes expulsen l'estel de neutrons en una direcció contrària a l'evolvent de runes residuals del romanent.

La conseqüència és una explosió asimètrica que dona lloc a aquesta irregularitat sorprenent dels romanents de les supernoves. Apareixen altres inestabilitats en els corrents quan l'ona travessa les capes de l'estructura de l'estel progenitor. Els elements químics sintetitzats durant la vida de l'estel es mesclen amb els originats en l'explosió. Ja que l'evolvent dels enderrocs estel·lars s'expulsen en llur major intensitat cap un costat, l'estrella de neutrons que queda en el mig surt disparada en direcció oposada. L'equip



desenvolupador d'aquest estudi ha detectat velocitats de retrocés que sobrepassen els 1000 Km/s, i que concorden amb els moviments observats en la majoria dels estels de neutrons (Veure figura).

A pesar dels avenços registrats en els últims anys, no s'ha arribat a un model amb un suficient realisme per mostrar tot el que esdevé en una supernova. Un model complet tindria 7 dimensions : les espacials (3 coordenades + el temps), l'energia dels neutrins i llur velocitat (descrita per dues coordenades angulars).

A mesura que els creadors de models van depurant llurs propostes, avancen a la vegada els que es dediquen a observar aquests fenòmens. Investigant en dominis poc explotats en el camp dels neutrins i de les ones gravitatòries. Els nous detectors de neutrins i d'ones gravitatòries potser aportaran moltes sorpreses relatives a la mort dels estels.

### **Supernoves històriques**

- SN 1054: Fou la que va originar l'actual nebulosa del Cranc. Es té referència d'ella pels astrònoms xinesos i també pels nadius indis americans.
- SN 1572: Supernova en Casiopea, observada per Tycho Brahe i Jerónimo Muñoz i descrita en el llibre *De Nova Stella* , en el qual s'usa per primera vegada el terme "Nova".
- SN 1604: Supernova en Ophiuchus, observada per Johannes Kepler; és l'última supernova vista en la Via Làctia.
- SN 1987 A: Supernova situada en el Gran Núvol de Magallanes, observada unes hores després de llur explosió, fou la primera oportunitat de posar a prova a través d'observacions directes les teories modernes sobre la formació d'aquests tipus d'estels.
- SN 2005ap: Aquesta supernova de tipus II és pel moment la més brillant observada. Va arribar a ésser 8 vegades més brillant que la Via Làctia.
- SN 2006gy<sup>3</sup>: Es va detectar en el nucli de la galàxia NGC-1260 i és la segona més gran que s'ha pogut detectar fins ara. En quan a lluminositat té 50.000 milions de vegades la del Sol. Es va originar per l'explosió d'un estel de 150 masses solars.

---

3. Sobre la Supernova Sn 2006gy, en l'època actual s'ha descobert que podria explotar de nou . Els astrofísics ens informen ara que els canvis en la brillantor d'aquesta supernova s'ajusten a un model de inestabilitat de parells pulsants. En aquest últim cas, la *implosió* inicial d'un estel amb una massa igual a 110 vegades la del Sol desprendria una massa equivalent a la de varis Sols; abans de la fusió del carboni i del oxigen, detenint-se així temporalment el seu col·lapse. Aproximadament 7 anys després, la inestabilitat de parells provocaria un segon col·lapse, que emetria una pulsació menor, encara que més ràpida, de matèria. (Investigació i Ciència, núm. 379, abril 2008. Barcelona (Secció Apuntes)

## BIBLIOGRAFIA

- ACKER, AGNÉS (1992). *Astronomie. Ed. Masson. Paris.*  
LEGLU, DOMINIQUE (1995). *Supernova. Ed. Celeste. Torrejón de Ardoz.*  
PRÓJOROV, A.M. (1996). *Diccionario de Física. Ed. MIR. Moscou.*  
SOBOLEV, V. (1990). *Cours D'Astrophysique Théorique. Ed. MIR. Moscou.*

## INTERNET

- [http://es.wikipedia.org/wiki/Supernova.](http://es.wikipedia.org/wiki/Supernova)  
[http://www.universquark.com/?p=268.](http://www.universquark.com/?p=268)  
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e9/Core-collapse-scenario.png>