

El pausat bategar dels estels¹

ENRIC MACIÀ BARBER

Universitat Complutense de Madrid

Si en arribar la nit ens allunyem dels llums de la ciutat i aixequem la vista cap al cel podrem contemplar la llum dels estels i, potser, preguntar-nos què són aqueixos rutilants puntets de llum, que ni lluen amb la mateixa brillantor ni exhibeixen el mateix color. Així, allà dalt del cel hivernal, Aldebaran, l'ataronjat ull del Bou, ens contempla silent mentre cap a l'extrem meridional la roja Betelgeuse i les blancoblavenques Rígel i Bellatrix configuren el contorn de la majestuosa constel·lació d'Orió, el Gran Caçador. Als seus peus, la formosa Sírius, el més brillant dels estels que podem veure als nostres cels, parpelleja destellades de blanc i indi. Avui, com ahir, com ho féu fa cinquanta segles en els càlids cels del baix Egipte, quan, a l'eixida del sol, el centelleig de Sothis anunciava a sacerdots i a llauradors que s'apropava la crescuda del Nil i, amb aquesta, un nou cicle de vida en la terra dels homes... amb el crepuscle matutí la llum del Sol, el nostre estel groc, ens descobreix l'ambient familiar del paisatge que ens envolta: palmeres frondoses i sicòmors estenent-se fins els límits del desert, on la roja Antares, l'ull de l'Escorpí, ens vigilarà al vespre del cel estiuenç... el cabalòs riu escolant-se cap al mar, cap al septentrió, on habiten la Gran Óssa i el seu petit osset, guardians de l'estel del Nord, acompanyades pels estels circumpolars, que mai no dormen sota l'horitzó... als nostres peus, mig soterrada en l'arena, una esquerda abandonada pels constructors de les piràmides, un fragment de granit: tan sols una mica de quars, feldspat i mica... una amalgama de minerals gestat a les entranyes de la Terra, el tacte de la qual, dur i fred, ens fa sentir més encara si pot ser, la tremenda llunyania d'aqueixos llocs remots on habiten els estels, reafirmant la nostra certesa que ells i nosaltres habitem móns separats per abismes d'immensitat.

I tanmateix...

Malgrat les fabuloses distàncies que ens separen, no sols en l'espai sinó també en el temps, ambdós móns participem d'un intricat i subtil nexa d'unió. En les últimes dècades la naturalesa d'aquesta relació ha anat desenterbolint-se. El bri inicial s'ha transformat en una complexa madeixa que s'estén per onsevulga, abraçant tot sencer l'univers.

Certament, l'atenció pacient dels savis dels últims segles ha permès desenvolupar un eficient mètode capaç de desxifrar el codi atrapat en la llum dels estels; així, hem descobert per exemple que cada un dels àtoms de ferro que fixen l'oxigen que respirem en les molècules d'hemoglobina de la nostra sang fou sintetitzat en el nucli de gegantescos estels desapareguts fa milers de milions d'anys. S'obre d'aquesta manera un nou capítol en la comprensió de la posició que ocupa l'aparició de la vida en el procés evolutiu global de l'univers. I de la nostra posició en aquest.

¹ Traducció del castellà de Joan Monferrer.

Sens dubte, un dels resultats més fascinant de l'astrofísica contemporània ha estat l'elucidació de l'origen dels diversos elements químics que s'agrupen en la taula periòdica. Efectivament, l'espectroscòpia ens ha demostrat que els components químics que constitueixen les diferents formes minerals, vegetals i animals que poblen el nostre planeta són els mateixos que podem trobar en els estels, nebuloses i cúmuls de la nostra galàxia, i fins i tot en la matèria de les allunyades fonts extragalàctiques. Existeix, per tant, una unitat química en la matèria de l'Univers. Aquesta unitat manifesta l'existència d'un principi comú per a la gènesi dels diversos elements químics. I així, avui en dia sabem que tots ells, a excepció de l'hidrogen, part de l'heli i algunes traces de liti i beril·li, s'han format a l'interior dels estels a través de les diferents fases que configuren el naixement, desenvolupament i mort d'aquests astres. Però abans d'endinsar-nos en l'apassionant capítol de l'astrofísica que versa sobre la vida i la mort dels estels desitjaria que el lector aixequés novament la seua vista al firmament nocturn i contemplés almenys per uns moments la seua magnificència... Ara ja podem iniciar la nostra aventura.

2. Què és un estel

Un estel no és res més que una esfera de gas que brilla en l'espai. Tanmateix, l'experiència habitual que tenim del gas no resulta apropiada en el cas d'un estel. A causa de les altes temperatures que hi regnen, els àtoms constituents de l'esmentat gas es troben ionitzats. Això significa el següent: considerem l'àtom d'hidrogen, el més simple de la natura. Aquest àtom és també el més abundant en un estel i està format per un protó de càrrega positiva i un electró de càrrega negativa que s'hi troba lligat. La causa d'aquest lligam és la interacció elèctrica que fa que el protó i l'electró s'atraguen mútuament. A temperatures baixes l'electró es troba molt a prop del protó, movent-se'n al voltant. A mesura que augmenta la temperatura, l'electró va saltant a posicions més allunyades del protó. Aquest procés acaba dràsticament: existeix una energia crítica en la qual l'electró se separa definitivament del protó. Ara ambdós es mouen lliurement sense estar lligats entre ells. En aquesta situació diem que l'àtom s'ha ionitzat. Com a resultat de la ionització obtenim un àtom ionitzat (el protó en aquest cas) i un o diversos electrons depenent de l'àtom particular de què es tracte i de l'energia subministrada a aquest. L'elevada temperatura a què està sotmès el gas d'un estel fa que pràcticament tots els seus àtoms estiguen ionitzats. A un gas d'aquest tipus se l'anomena plasma, i hi trobem centenars de milers de milions de bilions d'àtoms ionitzats que es mouen aleatòriament, en totes les direccions, a grans velocitats. Però aleshores, per què no es dissol aquest plasma en l'espai? En efecte, ja que tots els seus elements constituents es mouen atropelladament, sembla lògic suposar que en el transcurs del temps el gas s'anirà expandint a poc a poc difuminant-se en l'espai.

Tanmateix, això no és així. La causa és la força de la gravetat. Com que el nombre d'ions del gas que forma l'estel és enorme, les partícules de les regions internes d'aquest gas atrauen, en virtut de la seua massa, els ions que es troben en les zones més externes, tal com estableix la llei de Newton de la gravitació. Com a resultat, a mesura que aquestes partícules s'allunyen i es refreden, el seu moviment s'acomoda progressivament al dictat ferri de l'acció gravitatòria fins que, finalment, les partícules més allunyades inverteixen

el sentit de la seua marxa i es precipiten cap a l'interior de l'estel. Així s'origina una pugna entre les partícules internes, que es mouen preferentment cap a l'exterior, i les que, atretes per aquestes, cauen cap a l'interior. El resultat d'aquesta lluita titànica entre moviments antagònics és que el gas de l'estel s'estabilitza, i apareix, a una distància determinada del centre d'aquest, una regió fronterera on les partícules, majoritàriament, no cauen ni fugen. Aquesta frontera constitueix la superfície de l'estel. Com que la força de la gravetat actua de la mateixa manera en totes les direccions, tots els punts de la frontera es troben a la mateixa distància del centre. Raó per la qual el resultat final és que la superfície de l'estel adquireix una forma esfèrica, i al seu interior es troben confinats tots els ions constituents del gas estel·lar.

Aquest és l'aspecte dinàmic en què se'ns mostren els estels. I veiem que són dues les forces antagòniques que mantenen l'estel en el seu equilibri dinàmic: la gravetat, que tendeix a comprimir-la, i la pressió expansiva, que el plasma de l'estel posseeix en virtut de la seua temperatura. Si per alguna raó una d'aquestes dues forces prevalgués, l'estructura de l'estel es tornaria inestable i iniciaria el camí de la seua mort.

Hem de preguntar-nos aleshores quina és la font d'energia que manté aqueix gas calent, evitant el col·lapse de l'estructura estel·lar. La resposta ens la va donar Einstein a través d'una de les seues fórmules més conegudes: $E = m c^2$. Segons aquesta expressió, sota determinades condicions, una certa fracció de la massa d'una partícula pot transformar-se en una quantitat equivalent d'energia. Una de les evidències més espectaculars i dramàtiques d'aquesta llei la tenim en la bomba atòmica, en la qual una part de la massa dels àtoms d'urani que la constitueixen es transforma en energia d'un alt poder destructiu. En realitat l'estel actua com una bomba d'hidrogen gegantesca, amb la peculiaritat que la seua explosió és enormement lenta: dura molts milions d'anys. Tècnicament, els processos dels quals l'estel extrau la seua energia es coneixen amb el nom de *reaccions termonuclears*. D'aquesta manera, podem afirmar que l'estructura d'un estel es manté en virtut d'un equilibri entre la interacció gravitatòria i l'energia alliberada pels processos termonuclears que es produeixen al seu interior. Però, per quina raó es produeixen aquests processos al seu si?

3. Naix un estel

La nostra història s'inicia en un núvol obscur de gas fred situat en una determinada regió de l'espai, similar a l'escenari que ens mostra la fotografia 7.a (al final del volum), situada en la gran nebulosa d'Orió, una regió conspícua del cel al voltant de l'estel central de l'espasa que penja del cinturó del Gran Caçador. La massa d'aquesta nebulosa és mil vegades la del nostre Sol, i la seua temperatura, en la regió requadrada en la figura, és molt baixa: uns 10 K (utilitzem ací l'escala de *temperatura absoluta*, en la qual 0° C equivalen a 273 K, graus Kelvin; així, 10 K seran -263° C). Aquest núvol s'estén en l'espai abraçant un diàmetre aproximat de 30 a 40 anys llum. Recordem que l'any llum és una mesura de distància que equival, en nombres rodons, a nou bilions i mig de km!

A causa d'una multiplicitat de factors, en què juga un important paper la força de la gravetat, les regions més denses d'aquest núvol es fragmenten en un elevat nombre de petites nebuloses d'un any llum de diàmetre. Aquests núvols es coneixen com *glòbuls de*

Bok, i la seua composició química és, aproximadament, d'un 74% d'hidrogen, un 25% d'heli i tan sols un 1% dels elements més pesants. A partir d'aquí cada glòbul es condensa a causa de la força de la gravetat. La rapidesa i l'eficàcia d'aquesta contracció depenen de la massa inicial del glòbul. Així, si la massa és molt petita (menor que vuit centèsimes de la massa solar), la compressió és tan lenta que no arribarà a formar-se un estel, obtenint-se en aqueix cas un objecte que està a mitjan camí entre el regne del estels i els planetes i que es coneix com *nan marró*. Però si la massa inicial supera aquest valor, la contracció és relativament ràpida i en uns pocs mil·lennis el glòbul es transforma en un *protoestel*. Ara el seu diàmetre és de l'ordre de cent milions de km, un centenar de vegades la mida del nostre Sol. En contraure's, el núvol allibera energia que cedeix al gas, de forma que la seua temperatura arriba ja als 2.500 K, i la seua superfície s'il·lumina amb una pàl·lida resplendor rogenca. A partir d'aquest moment la gravetat actua vertiginosament. En uns centenars d'anys el protoestel veu reduït el seu diàmetre fins uns trenta milions de km. En aquest procés s'allibera una enorme quantitat d'energia, i el gas s'ionitza per complet fins a arribar, en les seues regions centrals, a temperatures de milions de graus. En aqueixes temperatures els protons, resultat de la ionització de l'hidrogen, poden xocar entre ells de forma eficaç i iniciar una sèrie de processos en cadena, començant per l'anomenada reacció protó-protó. Per què és necessari arribar a temperatures tan altes perquè puguen iniciar-se els processos termonuclears?

Novament la resposta requereix la consideració de dues forces diferents, però en aquest cas les esmentades forces posseeixen una intensitat desigual i actuen a escales espacials molt diferents. Així, a escales de mil·límetres, mil·lèsimes de mil·límetre i fins i tot milionèsimes de mil·límetre, la força predominant entre dos protons que s'aproximen mútuament és la repulsió electrostàtica a causa del fet que ambdues partícules posseeixen càrrega elèctrica del mateix signe. Aquesta repulsió serà més intensa com més a prop estiguen ambdues partícules, de manera que aquesta interacció impedeix que les esmentades partícules col·lidesquen. Tanmateix, aquesta col·lisió és necessària perquè la reacció termonuclear puga produir-se. Efectivament, si els dos protons arribessen a aproximar-se fins a una distància de l'ordre de la bilionèsima de mil·límetre, aleshores la repulsió electrostàtica seria àmpliament superada en intensitat per la poderosa força nuclear, que si bé és moltíssim més intensa que aquella, veu limitat el seu radi d'acció a una diminuta porció de l'espai que envolta el protó.

Podem comprendre aleshores la naturalesa paradoxal de la disjuntiva a què es veu sotmesa la matèria estel·lar: a fi de poder produir-se una reacció termonuclear que aporte energia al gas de l'estel i que evite d'aquesta manera el seu col·lapse gravitatori, les partícules carregades que componen el gas han d'estar animades d'unes velocitats extraordinàries, capaces de superar la barrera de repulsió electrostàtica. I l'energia necessària per dotar les partícules de tals velocitats requereix que s'establesquen al si de l'estel temperatures milionàries, temperatures que, alhora, s'aconsegueixen deixant que la gravetat comprimesca el gas de l'estel, escalfant-lo...

Apareix així, en un punt de l'estel, una espurna de radiació que dura una fracció de segon, radiació que s'allibera en transformar-se quatre protons en un nucli d'heli (el segon element de la taula periòdica) després d'una seqüència encadenada de col·lisions nuclears. En un instant es produeix una altra espurna més enllà. I després una altra, i una

altra més. Són els primers balbotejos. Poc a poc la cadena de reaccions es ramifica pertot arreu, i es presagia la proximitat d'un instant crític pel vertiginós frenesí amb què els àtoms esdevenen sense parar acoblant la matèria i l'energia. De sobte... Una cascada de llum inunda les entranyes de l'incipient sol. El trèmul balboteig s'ha tornat bramul multicolor. Un torrent de radiació ascendeix apressat travessant la superfície de l'astre, que s'encén en una viva resplendor. I un nou punt de llum brilla entre esquinçalls de pols al si eteri i gasós de l'obscura nebulosa. Envoltada en el fred, la tenebra i el silenci més insondable, un estel ha nascut.

4. Una llarga joventut

Des del primer moment de la seua existència l'estel ha de lluitar per preservar-la, mantenint al forn termonuclear del seu interior la temperatura i la pressió suficients per prevenir el col·lapse de les capes que constitueixen el gruix del seu embolcall extern. Com és natural, com major sia la seua massa inicial major serà el cost energètic requerit per mantenir aqueix equilibri. Amb la finalitat d'il·lustrar les magnituds de què parlem, podem agafar com a referència el nostre Sol, un estel de tipus mitjà en la Galàxia. Cada segon el Sol converteix sis-cents milions de tones d'hidrogen en heli per tal de prevenir el col·lapse dels dos mil quadrilions de tones de gas que constitueixen la suma de la seua massa. I du transformant hidrogen en heli, més o menys al mateix ritme, des de la seua formació, fa uns cinc mil milions d'anys. D'acord amb els darrers còmputos s'estima que el Sol disposa de reserves d'hidrogen suficients per mantenir aquest ritme de combustió, i amb ell assegurar la seua existència, per un període similar, de manera que el nostre estel està completant la primera meitat de la seua joventut, que en l'argot astrofísic s'anomena fase de seqüència principal. Es tracta d'un període plàcid en el cicle vital dels estels, en què passen la major part de la seua existència, sense experimentar grans ensurts, consumint indolents les seues reserves d'hidrogen...

Encara que també es produeixen notables excepcions. Una petita fracció del total dels centenars de milers de milions d'estels que es formen en una galàxia convencional posseeixen masses superiors a deu o vint masses solars, sent extraordinàriament escasses aquelles que aconsegueixen arribar al centenar. Per raó de la seua extraordinària massa aquests estels dilapiden les seues reserves d'hidrogen a un ritme fabulós, esgotant el seu combustible inicial en uns pocs milions d'anys, un interval de temps molt reduït per a la vida dels sols.

Ara podem comprendre, en tota la seua magnitud, la profunda tragèdia que envolta l'existència dels astres que poblen la nit. Vinguts a l'existència de la mateixa mà que els ofega i els empeny cap a una fugida sense eixida aparent: els poderosos tentacles de l'omnipresent força gravitatòria s'hi aferren configurant el seu contorn esfèric i, vencent la natural repulsió electrostàtica de les seues partícules constituents, les forcen a una col·lisió permanent d'on resulta la progressiva transformació de l'hidrogen, relíquia de la matèria creada en la Gran Explosió primigènia, en heli, element que rep aquest nom per haver estat descobert precisament per primera vegada en la subtil atmosfera del Sol.

5. Gegants rojos

A primera vista, tot aquest tràgic malbaratament de força i energia podria semblar un absurd sense sentit, abocat, sens dubte, a una trista fi. I tanmateix, la crisi a què s'enfronten ineludiblement tots els estels quan la seua reserva inicial d'hidrogen inevitablement s'esgota dóna lloc a una sèrie de processos d'extraordinària importància, dels quals es deriva la riquesa química del nostre actual univers, per ser aquests processos els que determinen, en última instància, la ulterior evolució de la matèria i l'energia al si de la galàxia.

En efecte, quan el combustible inicial s'esgota es produeix un descens brusc de pressió en les regions centrals de l'estel, i aquest pateix un sobtat col·lapse gravitacional que no s'atura fins que al seu nucli s'assoleixen temperatures d'un centenar de milions de graus. Aquestes condicions de temperatura i pressió resulten ara adequades per iniciar un procés en el qual tres àtoms d'heli es combinen entre si per tal de formar un àtom de carboni. Alhora, les capes externes de l'estel s'expandeixen assolint milions de vegades el volum del Sol, i enrogeixen en disminuir la temperatura efectiva en les seues dilatades superfícies. A causa de l'aspecte que adquireixen en passar per aquesta fase aquests estels es coneixen amb el nom de *gegants rojos*. Dos il·lustres exemples d'aquesta categoria ho constitueixen els estels Betelgeuse i Antares, cèlebres robins dels cels hivernal i estival, respectivament.

És important esmentar que, en condicions usuals, una reacció en què concorren simultàniament tres cossos és altament improbable i que, per tant, els estels gegants rojos, en què aquest procés té lloc, permeten evitar un problema d'importància cabdal en els primers models de nucleosíntesi primordial, com era l'elevada inestabilitat de l'àtom de beril·li, precursor necessari per a la formació de l'àtom de carboni en els esmentats models. I a més, explicar per què es troba el carboni entre els elements més abundants de l'univers.

6. El pausat batec dels estels

El comú dels estels inverteix en la fase de gegant roig aproximadament una cinquena part del període invertit durant la seua fase d'estada en la seqüència principal, que en el cas del nostre sol suposarà uns dos mil milions d'anys de combustió d'heli en carboni. Com hem esmentat, durant aquesta fase de l'evolució estel·lar el radi dels estels s'incrementa considerablement, i pot arribar a valors superiors als centenars de milions de km, i fins i tot aproximar-se, com en el cas de Ras Algheti, l'estel principal de la constel·lació d'Hèrcules, als mil milions de km. Així, quan el Sol s'espandesca, d'ací uns cinc mil milions d'anys, engolirà en el seu si els planetes Mercuri i Venus, abraçant un perímetre pròxim a la mida de l'òrbita terrestre.

Hem dit al principi que la mida d'un estel està determinada per un equilibri precís entre la compressió gravitatòria i la pressió expansiva dels gasos calents de les seues regions internes. És per això raonable comprendre que, en arribar a aquesta fase de major desequilibri energètic, l'estel gegant patisca determinats desajustaments en seu balanç d'energia, que es tradueixen en l'aparició d'un moviment oscil·latori en virtut del qual les capes superficials de l'estel s'expandeixen i es contrauen cíclicament buscant reajustar el seu flux d'energia, variant periòdicament tant la seua grandària com la seua lluminositat. Per aquesta raó reben el nom d'*estels variables polsants*.

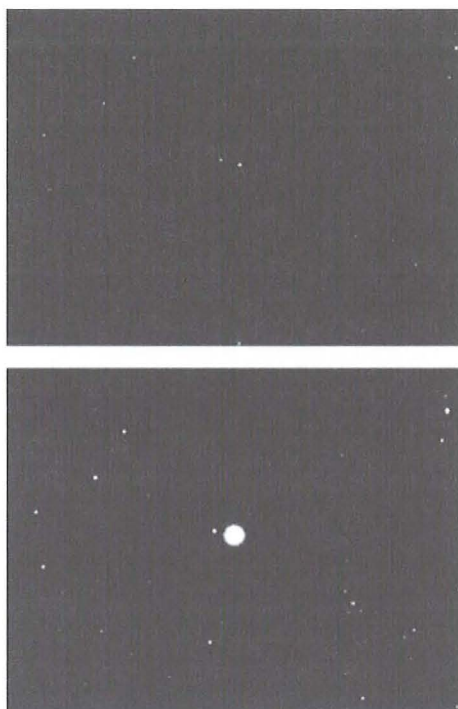


Figura 7.1. En aquestes imatges s'illustra la variació en la lluminositat de l'estel variable o Ceti. La imatge superior fou agafada en desembre de 1961, mentre que la imatge inferior correspon a gener de 1965. Pot apreciar-se clarament l'extraordinària variació en la brillantor de l'estel a causa de la pulsació de les seues capes més externes.

El primer estel variable d'aquest tipus fou descobert, en 1595, per l'astrònom aficionat alemany David Fabricius (figura 7.1). Es tracta d'un dèbil estel de la constel·lació de la Balena la lluminositat del qual oscil·la en un factor de cent en un període de 332 dies, motiu pel qual fou anomenada *Mira Ceti* o el Meravellós estel de la Balena. Es tracta d'un gegant roig, que igual com altres congèneres de la seua mateixa espècie, ejecta a l'espai que l'envolta, en cadascun dels seus batecs, ingents quantitats de pols de grafit i partícules de sílice amb què enriqueix el medi interestel·lar.

Un altre conjunt d'estels polsants de singular importància per a l'agrimensura dels espais celests el constitueixen les *variables cefeïdes*, que reben tal nom per haver estat descobert el seu primer representant en la constel·lació de Cefeo. En aquests estels el període dels seus batecs guarda una relació estreta amb la seua lluminositat, de manera que com més lluminós sia un cefeïde major és el període de les seues oscil·lacions. Ja que el temps transcorregut entre cada oscil·lació pot mesurar-se fàcilment, és possible inferir d'aquesta dada la quantitat de radiació emesa per la seua superfície a cada instant i, comparant aquesta xifra amb la brillantor aparent que l'estel ens mostra en la seua llunyania, deduir la distància que la separa de nosaltres, ja que la seua brillantor aparent

disminueix amb l'invers del quadrat d'aqueixa distància. El cèlebre estel Polar, guia del nord, és un cefeide, amb un període de pulsació d'aproximadament quatre dies. Per tractar-se d'estels gegants, i per això molt lluminosos, és possible observar-los no sols en la nostra galàxia sinó també en altres galàxies pròximes. Així doncs, el pausat bategar d'aquests estels ens ha permès mesurar la distància que ens separa de la nostra magnífica veïna, la galàxia d'Andròmeda, armats amb una singular vara de mesurar: un cronòmetre!

7. La primera cruïlla

A mesura que l'heli existent en les regions centrals dels gegants rojos s'esgota, l'estel experimenta nous processos encaminats a preservar la seua ja precària estructura. Les característiques peculiars d'aquests processos depenen crucialment de la massa de l'estel. Així, els estels la massa dels quals sia superior a unes quatre masses solars experimenten una sèrie d'inestabilitats que condueixen finalment a la seua destrucció definitiva. Contràriament, els estels de menor massa, entre els quals es troba el nostre Sol, sofriran processos menys dramàtics, però no per això menys rellevants per a l'evolució de la matèria en l'univers. En efecte, al llarg de les últimes fases de l'evolució estel·lar els estels de menor massa es desprenen d'importants quantitats de matèria enriquida amb els àtoms formats al seu forn nuclear, aportant al medi interestel·lar àtoms complexos que s'empraran en el procés següent de l'evolució química. Per la qual cosa, depenent de la seua massa, la mort dels estels pot produir-se de forma serena i tranquil·la o, pel contrari, tenir lloc envoltats d'una violència inconcebible. Ens trobem, doncs, davant la nostra primera cruïlla. I la sendera que agafem dependrà de la massa del nostre protagonista.

8. Nebuloses planetàries

Un estel de tipus solar tarda aproximadament cent milions d'anys a consumir tot l'heli contingut en les seues regions centrals (transformant-lo en carboni i oxigen), moment en el qual les reaccions termonuclears cessen al seu interior. Aleshores aquestes regions centrals es col·lapsen alliberant energia potencial gravitatòria en forma de calor que s'empra per iniciar la combustió de l'escàs heli que hi ha en les regions perifèriques al nucli. En resposta a aquesta última alenada, les capes més externes de l'estel s'expandeixen novament. En aquesta etapa el radi de l'estel és comparable a la grandària de l'òrbita del planeta Mart (uns dos-cents milions de km) i la seua estructura bàsica consisteix en un nucli degenerat de carboni i oxigen de la mida aproximada del nostre planeta (uns deu mil km), envoltat per una primíssima capa concèntrica on es cremen les escasses provisions d'heli, i sobre la qual s'apila la gegantesca mola constituïda per la massa que queda de l'estel. Com és fàcil d'imaginar, aquesta precària estructura no pot durar massa. I a mesura que esgota els seus últims recursos, la compressió gravitatòria produeix una sèrie de convulsions que donen lloc a l'ejecció progressiva de les capes més externes de l'estel, que s'expandeixen en l'espai com volutes concèntriques, tal com s'il·lustra en la fotografia 7.b (al final del volum). El resultat final d'aquest procés dóna com a resultat un nucli central que queda al descobert i que correspon a un nou tipus d'astre denominat *nan blanc*, i per una altra banda un embolcall de gasos fluorescents sota l'acció de la intensa radiació ultraviolada emesa pel nucli nu de l'estel, que rep el nom de *nebulosa planetària*.

Les nebuloses planetàries constitueixen un fenomen molt comú en la galàxia, estimant-se el seu nombre aproximat entre 20.000 i 50.000. Com que un estel de tipus solar pot desprendre's d'un 40% de la seua massa al llarg d'aquest procés (sent una fracció encara superior per als estels de major massa), veiem que la formació d'aquest tipus de nebuloses al final del seu cicle vital constitueix un procés molt eficaç per enriquir el medi interestel·lar amb els àtoms de carboni, oxigen i nitrogen produïts a l'interior de l'estel al llarg de les primeres etapes de la seua existència. I ja que el procés triple alfa, que s'esdevé al si dels estels gegants rojos, és l'únic mecanisme de síntesi conegut per al carboni, podem afirmar que tota la matèria present a la biosfera del nostre planeta fou en algun moment sintetitzada en el nucli d'estels gegants rojos que precediren la formació del nostre sistema planetari, i que aquests àtoms foren posteriorment incorporats a la nebulosa protoplanetària a partir de la qual es formaren el Sol i el seu seguici planetari fa uns cinc mil milions d'anys (vegeu l'article de Josep Maria Trigo, «A la recerca de l'origen del Sol, la Terra i la vida», en aquest mateix número de l'*Anuari*).

9. Nans blancs

Per als estàndards estel·lars, les nebuloses planetàries tenen una vida mitjana molt curta, tan sols uns 50.000 anys, temps que tarden els gasos ejectats pel gegant roig a mesclar-se definitivament amb la matèria del medi interestel·lar que el circumda. Com que la velocitat d'expansió característica d'aquests gasos és d'uns 20 km/s, podem estimar la grandària mitjana de las nebuloses planetàries en un any llum, aproximadament.



Figura 7.2. Sírius, l'estel més brillant del nostre firmament, posseeix una petita companya anomenada Sírius B. Es tracta del primer nan blanc descobert. Malgrat l'elevada temperatura de la seua superfície, unes 30.000 K, resulta pràcticament eclipsada per la proximitat de Sírius A.

Què ocorre aleshores amb el nucli nu del nostre estel quan els seus embolcalls externs, després de la seua efímera esplendor, s'esvaeixen per sempre?

Com hem vist, aquest nucli, d'una mida aproximada a la de la Terra, és incapaç de generar les condicions propícies de temperatura i pressió per poder cremar el carboni i l'oxigen que el constitueixen majoritàriament. Efectivament, manca de massa suficient per vèncer l'extraordinària repulsió electrostàtica que els ions de carboni (amb sis unitats de càrrega positiva) i els ions d'oxigen (amb vuit unitats de càrrega) exerceixen entre si. Tanmateix, el nucli de l'estel no segueix tampoc col·lapsant-se sota l'acció de la gravetat. Quina força és capaç de detenir, novament, els seus efectes?

Com a les millors novel·les d'acció, quan sembla que ja no podem fer res per salvar el nostre desesperat protagonista, la Natura se les enginya per introduir un nou personatge en la trama de la nostra història. I cal reconèixer que la nova força és subtil. Es tracta d'un fenomen que involucra l'enorme eixam d'electrons que pul·lulen en el nan blanc, i que han vist considerablement reduït el seu espai vital. Aquest eixam electrònic exerceix una extraordinària pressió, capaç de contrarestar la compressió gravitatòria i, d'aquesta forma, garantir l'estabilitat estructural del nucli estel·lar. Garantir-la, sí, malgrat que la temperatura de l'esmentat nucli, que manca de mecanismes de generació d'energia, decreix a poc a poc des dels cent mil graus que tenia quan l'estel començà despullar-se del seu embolcall extern, fins uns -270 graus centígrads, la temperatura aproximada d'equilibri amb la radiació de fons còsmic. I això resulta sorprenent, perquè un gas convencional disminueix la seua pressió quan es refreda. Però, el gas format per l'eixam d'electrons no té res de convencional (en l'argot tècnic se'l coneix com un gas degenerat d'electrons) i presenta la inusitada propietat que la seua pressió no disminueix gens per molt que decreixa la seua temperatura. I és precisament aquest extravagant comportament quàntic el que preservarà la integritat estructural del nan blanc fins a la fi dels seus dies. I així, el nostre Sol es convertirà en un nan blanc de la mida del nostre planeta i una densitat mil milions de vegades superior a la de l'aigua després del seu període com a gegant roig. La seua lluminositat serà aleshores tan sols una desena part de l'actual, i es reduirà a menys d'una centèsima part cinc mil milions d'anys després. I amb el pas del temps el cadàver del nostre estel simplement s'esvairà en l'obscuritat.

Però no tots els estels acabaran igual, ja que tota força posseeix els seus límits propis, i la pressió que és capaç de suportar el nostre eixam d'electrons degenerat sols pot resistir la compressió gravitatòria exercida per una massa equivalent a 1,4 vegades la massa del nostre Sol. Aquest valor numèric precís, conegut com massa límit de Chandrasekhar, suposa per tant una segona cruïlla en el cicle vital dels estels. I marca la frontera que permet als sols assolir una mort dolça. Doncs tot estel que ho supere trobarà, irremeiablement, un tràgic desenllaç...

10. Supernoves i pulsars

Els estels la massa dels quals supera en unes vuit vegades la massa del nostre Sol són capaços de seguir cremant elements més pesants que l'heli quan aquest combustible s'acaba. En efecte, en raó de la seua major massa, són capaços d'assolir condicions de temperatura i pressió suficients per vèncer la repulsió electrostàtica cada cop major dels nous nuclis pesants de carboni i oxigen, i així, a temperatures que ara es xifren en milers

de milions de graus, transformar, en ordre de creixent complexitat, el carboni en magnesi, l'oxigen en sofre i neó... fins arribar al ferro. Ací la seqüència de reaccions termonuclears s'atura irremeiablement, ja que aquest nucli és el més estable de tots els elements i, conseqüentment, la seua combustió nuclear, en lloc de generar energia, la consumeix!

Procés	Productes principals	Temperatura (milions K)
Combustió de l'Hidrogen	Heli	10-20
Combustió de l'Heli	Carboni, Oxigen	100
Combustió del Carboni	Neó	1.000
Combustió del Neó	Magnesi, Oxigen	1.300
Combustió de l'Oxigen	Silici, Sofre	2.000

Taula 1. Relació dels diferents combustibles emprats per un estel de 25 masses solars al llarg del seu cicle vital, acompanyats dels productes que es deriven de la combustió i de la temperatura a què aquesta s'efectua.

D'aquesta manera, la crisi que s'inicià en las regions centrals de l'estel quan aquest exhaurí el seu hidrogen acaba catastròficament: després d'una activitat incessant al llarg de milions d'anys, el centre de l'estel cessa de produir energia. Ara la força de la gravetat pot actuar a la seua d'acord amb els seus desigs, i ho fa amb una rapidesa tal que en pocs segons totes les regions internes d'aquest sol cansat es col·lapsen a una velocitat de vertigen. Aquest rapidíssim col·lapse fa que s'allibere de forma sobtada una gran quantitat d'energia, emmagatzemada durant molt de temps per la força de la gravetat. I així l'estel esclata.

Es tracta, sens dubte, d'una situació paradoxal: mentre el nucli central de l'estel es comprimeix cada vegada més, el seu embolcall extern és expulsat per l'acció d'una poderosa ona de xoc cap a l'espai exterior a velocitats fantàstiques, de milers de km per segon. A aquest cataclísmic procés se'l coneix amb el nom d'*explosió supernova*, i determina la seua irreversible fi. En aqueix instant darrer, l'estel moribund esquinça l'obscuritat dels cels amb el seu cant de cigne, un cant d'inusitat esplendor i enegadora resplendor ja que, durant el seu breu esclat, la supernova pot rivalitzar en brillantor amb la llum emesa per tots els estels de la galàxia junts. I el seu últim adéu pot ser contemplat des dels més remots racons de l'univers, tal com es mostra en la figura 7.3.

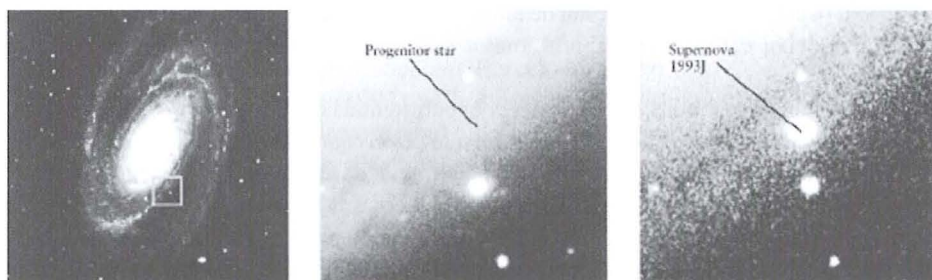


Figura 7.3. Supernova 1993J descoberta el 28 de març de 1993 per l'astrònom aficionat espanyol Francisco García Díaz, en la galàxia M81 de la constel·lació de l'Óssa Major que es troba a dotze milions d'anys llum de la Terra. La seqüència d'imatges mostra l'aspecte dels ravals galàctics d'M81 abans (b) i després (c) de l'explosió.

Al voltant del punt que ocupà l'estel, una aurèola irregular de vistosos colors s'expandeix amb els anys a través de l'espai (fotografia 7.c, al final del volum). Són les restes de l'embolcall extern de l'estel.

I al seu bell mig, l'oïda atenta dels poderosos radiotelescopis pot captar un senyal intens i breu que, com un far llunyà, emet brevíssimes polsades de radiofreqüència. Es tracta del nucli de l'estel comprimit per l'acció de la gravetat fins arribar a un radi d'a penes uns pocs km en què s'empresonen, sotmesos a densitats de trilions de grams per centímetre cúbic, la ingent multitud de partícules que ans constituïren el volum immens d'un majestuós estel supergegant. Aquest astre peculiar, en què a causa de l'enorme compressió gravitatòria els protons i els electrons de l'eixam de gas s'han fos per donar pas a un ingent nombre de neutrons, rep el nom de *pulsar*, acrònim anglosaxó dels termes *pulsating star*: I veiem com, un cop més, la Natura se les enginya per prevenir el col·lapse definitiu de la massa de l'estel que, en el cas del supergegant progenitor de la supernova, superava amb escreix la massa límit de Chandrasekhar, la massa que marcava el límit de la segona cruïlla. En aquest cas no es tracta d'un eixam electrònic, sinó d'un empaquetament extraordinàriament compacte de neutrons, deu bilions de vegades més dens que el plom, el que frena la compressió gravitatòria. Per aquesta raó, el nucli residual del gegantesc estel es coneix amb el nom d'*estel de neutrons*, i representa la forma més densa de matèria que es pot imaginar: en una reduïda esfera d'uns deu km de diàmetre s'acumula quantitat de massa tal que pròpiament podem dir que, més que un estel diminut, el que aquest tipus d'astre representa és un nucli atòmic d'una grandària gegantina.

11. Forats negres

Fins quan? —podríem dir emulant l'orador llatí. Fins quan serà la Natura capaç d'eludir el setge de la implacable gravetat? Doncs, inevitablement, sols fins a un cert límit. Límit que, una vegada més, depèn també de la massa que ostente el nucli residual de l'estel. Límit, que en aquesta ocasió, resulta molt més difícil de precisar quantitativament, ja que depèn de la naturalesa de les forces nuclears que s'estableixen entre els comprimits neutrons i sobre les que existeixen certes incerteses. Límit que suposa l'aparició en el curs de la nostra història d'una tercera, i per ara definitiva, cruïlla.

Què li ocorre aleshores a un estel de tan gran massa que, després de sofrir una explosió supernova deixa enrere un nucli amb massa suficient com per superar aquesta tercera cruïlla?

Arribats en aquest punt, les evidències experimentals es redueixen i es desdibuixen, encara que sembla existir bon acord en el fet que per creuar el llinar el nucli de l'estel ha de superar les tres masses solars. La concentració de tal quantitat de matèria en el reduïdíssim espai d'una esfera quilomètrica produeix una extraordinària distorsió de les propietats mateixes de l'espai i del temps al seu voltant, que es deformen com si es tractés d'un substrat elàstic, produint un profundíssim embut del qual ni tan sols la mateixa llum, el més rabent dels missatgers que poblen el cosmos, pot aconseguir escapar. De manera que, en virtut de la seua pròpia naturalesa, cap missatge no pot arribar-nos procedent de l'avenc gravitatori que defineix i configura el *forat negre*. I d'aquí la raó del seu nom.

Tanmateix, encara que no puguem pretendre veure el seu rostre desfigurats, la seua presència es fa sentir, inevitable, pel seu extraordinari poder d'atracció sobre tota la matèria que l'envolta, tal com s'il·lustra en la recreació artística mostrada en la fotografia 7.d (al final del volum). Eloqüent imatge on un orgullós gegant blau resulta implacablement devorat per un invisible, encara que mortal, company.

12. Naix un nou dia

I després de l'última cruïlla arribem, per fi, a la fi del nostre camí. O potser no? Perquè ara és possible que el dit màgic dels cels ens haja tocat amb el seu inefable misteri i, en aixecar novament la vista per trobar-nos amb el firmament estelat, compreguem millor el seu drama i el seu destí, i, per primera vegada, sentim enyorança per aquells estels perduts que, en extingir-se i sembrar l'espai amb les seues restes, aportaren fa ja tants i tants anys, la matèria en forma de llavor de què el nostre Sol, el nostre planeta i nosaltres mateixos estem fets. Doncs ara sabem que som cendres... cendres d'anònims sols, als quals mai no veurem, ja que les seues llums s'extingiren abans que el nostre Sol nasqués. I, potser per primera vegada, sentim el ressò llunyà de la seua nostàlgia...

Quina inusitada sorpresa en experimentar que la ciència rigorosa i freda és un instrument capaç de despertar nobles sentiments en la intel·ligència!

No obstant això, no hem de reduir la nostra consideració tan sols al passat remot. Atravem-nos a imaginar també, a la llum de la raó, el remot futur. Puix ara ja sabem que aqueixos rutilants punts de llum que brillen en la nit són el gresol on es forja la matèria amb què es compondrà aqueix univers que espera, amagat en el present. Un univers anàleg: semblant i diferent. Subjecte a un destí metòdic i inexorable que percebem vagament en el ritme sincopat del pausat batejar dels estels. Un escenari futur on, potser, éssers semblants a nosaltres contemplen amb sàvia admiració la magnificència d'un nou cel, des d'una nova terra.

BIBLIOGRAFIA

- CLAYTON, D. D. (1983): *Principles of stellar evolution and nucleosynthesis*, Chicago, University of Chicago Press.
- DAVIES, P. (1985): *El Universo desbocado*, Barcelona, Salvat.
- HERNÁNDEZ, M. V. i E. MACIÀ (1997): «Chosmochemistry: An interdisciplinary study of the origins of chemical elements and of life», *The Science Teacher*, octubre, 37-41.
- ISERN, J. (1987): «Nacimiento, vida y muerte de las estrellas», *Astrum*, 74, 14-15.
- KNAPP, G. (1995): «The stuff between the stars», *Sky & Telescope*, May, 20-25.
- MACIÀ, E. i M. V. HERNÁNDEZ (1995a): «El Origen de la Vida a la Luz de las Estrellas», *Astrum*, 128 (monografia editada per l'Agrupació Astronòmica de Sabadell).
- (1995b): «Implicaciones astrofísicas en el origen de la vida», *Revista Española de Física*, 9 (3), 28-32.
- MACIÀ, E. i altres (1997): «Primary sources of phosphorus and phosphates in chemical evolution», *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, 27, 459-480.

- SHIPMAN, H. L. (1982): *Los agujeros negros, los cuásars y el Universo*, Madrid, Alhambra.
- TRIGO I RODRÍGUEZ, J. M. (1999): *Nosaltres a l'Univers*, Barcelona, Proa, Enciclopèdia Catalana.