

Explosions estel·lars de noves

Margarida Hernanz* i Jordi José†

Introducció

L'origen del nom *nova* ve de *nova stella*, que es refereix a l'aparició sobtada d'un estel allà on, aparentment, abans no hi havia res, seguida de la seva desaparició després d'unes setmanes o mesos. La lluminositat absoluta o intrínseca que assolixen les noves és entre $2 \cdot 10^4$ i $4 \cdot 10^5$ vegades la lluminositat del Sol. Avui en dia se sap que les explosions de noves succeeixen en sistemes estel·lars binaris, on un estel nan blanc captura matèria provinent del seu estel company. Un nan blanc és un estel, normalment de carboni i oxigen, que ha esgotat tot el seu combustible nuclear intern i que, en conseqüència, només disposa de la seva energia interna per anar radiant. Durant aquest procés de mort estel·lar, el nan blanc es va refredant fins a tornar-se invisible, fins i tot per als telescopis més potents. Ara bé, el destí d'un nan blanc és totalment diferent quan es troba en un sistema doble (estel binari), cosa que passa molt sovint amb tots els estels i, en particular, amb els nans blancs. En aquest cas, si l'estel company és prou proper i li transfereix matèria a través d'un disc d'acreció, el nan blanc pot desestabilitzar-se i explotar en forma de nova o en forma de supernova (de l'anomenat tipus Ia). La diferència principal entre ambdós fenòmens ja ve indicada en el nom: una supernova és, des del punt de vista d'observació, més espectacular que una nova. El canvi en lluminositat, o en magnitud,¹ és més gran en una supernova que en una nova (per un factor que pot ser de l'ordre de 10^5 en lluminositat). Pel que fa a l'origen de l'explosió, en el cas d'una supernova tot l'estel nan blanc és afectat per l'explosió i el fenomen és únic, mentre que les explosions de noves afecten només l'embolcall extern de l'estel nan blanc i el fenomen és recurrent, amb escales de temps típiques de més de 10.000 anys. Pel que fa a la freqüència de les explosions d'ambdós tipus, a

la nostra galàxia s'espera una explosió de supernova del tipus Ia cada aproximadament 1.000 anys, mentre que hi ha unes 30 explosions de noves per any, malgrat que sovint no se'n descobreixen gaires més de tres.

La distribució espacial de les noves a la nostra galàxia (Via Làctia) és difícil d'esbrinar, ja que l'extinció interestel·lar (reducció de la intensitat de la llum rebuda d'un cos celeste deguda a l'absorció i dispersió de la llum per la pols interestel·lar situada entre l'objecte emissor i l'observador) fa difícil observar-les en moltes regions de la galàxia. Se sap, però, que les noves es troben majoritàriament al disc de la galàxia i, especialment, al seu centre. També s'han detectat noves fora de la nostra galàxia, en concret, en galàxies properes com són els núvols de Magallanes i la galàxia d'Andròmeda.

Alguns exemples de noves importants dels últims anys són (s'anomena cada nova per la constel·lació de la regió del cel on es va observar i per l'any d'explosió):

- Nova Cygni 1975: va ser tan brillant que va fer canviar d'aspecte la constel·lació del Cigne durant uns quants dies.
- Nova Herculis 1991: va ser una nova molt brillant i que es va apagar molt ràpidament. En el seu espectre es van identificar ratlles de neó i sofre, d'entre altres.
- Nova Cygni 1992: aquesta nova ha estat observada en totes les longituds d'ona i detectada en totes excepte en la gamma. El telescopi espacial Hubble (HST) ha proporcionat imatges de les capes ejectades que indiquen asimetries en el procés d'ejecció de matèria.
- Nova Velorum 1999: aquesta nova ha esclatat molt recentment (21 de maig) i ja ha estat observada per l'HST i pels satèl·lits d'astronomia X Beppo-SAX i ASCA. Sembla que té característiques molt semblants a la Nova Cygni 1992, però amb major brillantor aparent en el màxim.

Observació de les noves

Una característica molt important de les noves (i de tots els fenòmens estel·lars variables) és la corba de llum, que dona la variació de la lluminositat, o magnitud, en funció del temps. Les observacions amb telescopis situats a la Terra donen la corba de llum anomenada *òptica* o *visual*, que pot especificar-se en diverses bandes fotomètriques (que poden arribar fins a l'infraroig observable des de la Terra). Les observacions fetes des de satèl·lits han permès abastar altres longituds d'ona dins del rang ul-

*Margarida Hernanz (Barcelona, 1956) és doctora en Física per la Universitat de Barcelona i científica titular del Consell Superior d'Investigacions Científiques. Actualment treballa a l'Institut d'Estudis Espacials de Catalunya.

†Jordi José (Barcelona, 1965) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona, catedràtic d'escola universitària al Departament de Física i Enginyeria Nuclear a la Universitat Politècnica de Catalunya i membre de l'Institut d'Estudis Espacials de Catalunya.

¹La magnitud és una quantitat utilitzada en astronomia per a mesurar la lluminositat; depèn logarítmicament de la lluminositat i decreix en augmentar aquesta. Una diferència de 5 magnituds representa una relació en un factor 100 de les lluminositats.

traviolat i infraroig, a més de les corresponents a altes energies (X i γ). Ja que moltes de les observacions tradicionals de les noves (almenys les corresponents al descobriment) les duen a terme afeccionats, es parla sovint de la corba de llum òptica o visual, sense més detalls; però, evidentment, per ser rigorosos cal especificar la banda d'energia concreta en què s'ha fet l'observació.

La figura 1 mostra una corba de llum típica de nova. En primer lloc, hi ha la pujada al màxim de lluminositat visual. Per a la major part de les noves aquest augment és molt ràpid. Molt poques s'han pogut observar durant la pujada al màxim, però s'ha pogut deduir que aquesta fase dura entre 1 i 3 dies. Aquesta fase correspon a l'expansió de l'embolcall com a conseqüència de la desintegració d'alguns isòtops radioactius sintetitzats durant l'explosió i transportats per convecció a les capes més externes de l'embolcall (vegeu la secció següent).

La posterior baixada de lluminositat visual succeeix amb escales variables segons la nova. Per classificar les noves segons la *velocitat* de la seva corba de llum (ritme amb el qual la lluminositat visual decreix), s'introdueix una quantitat anomenada t_2 , que és el temps, en dies, que triga la lluminositat en decreixer 2 magnituds per sota del màxim. Les noves anomenades *molt ràpides* tenen $t_2 < 10$ dies, mentre que per a les anomenades *lentes* és $81 < t_2 < 150$. Excepte el factor d'escala relacionat amb t_2 , les corbes de llum de totes les noves s'assemblen bastant. Després de la baixada en 3 magnituds respecte el màxim, la corba de llum passa per una *fase de transició* que no és igual per a totes les noves. Algunes noves passen per un mínim profund i després es recuperen, per prosseguir després amb la caiguda progressiva de lluminositat (vegeu la figura 1).

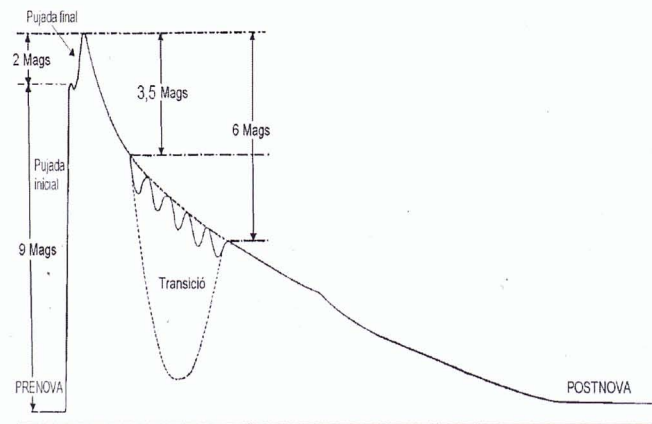


Figura 1: Corba de llum esquemàtica d'una nova típica (evolució de la lluminositat —o magnitud— visual en el temps)

El model que es creu vàlid per a la fase de *caiguda* en lluminositat de les noves suposa que es produeix una ejecció continuada de matèria, de forma quasiestacionà-

ria, amb lluminositat bolomètrica (és a dir, integrada a totes les energies) constant. Aquesta fase de lluminositat bolomètrica constant s'ha observat en la majoria de les noves, des del moment en què es van poder fer observacions en altres bandes a més de la visual. Per exemple, el satèl·lit IUE (International Ultraviolet Explorer) de la ESA, llançat l'any 1978 i que durà fins l'any 1996, va permetre observar l'emissió ultraviolada de les noves. A partir de l'observació de moltes noves en les fases postexplosives es va veure que un cop passat el màxim de lluminositat visual es produïa un màxim en l'emissió ultraviolada. Això es va interpretar com un desplaçament del pic de l'emissió cap a energies progressivament més grans, a causa del retrocés de la fotosfera (superfície aparent de la nova) relacionat amb l'encongiment de l'embolcall extens (un cop cessen les reaccions nuclears de desintegració) a lluminositat constant. Atès que la lluminositat és proporcional al radi de la fotosfera al quadrat, R_{fot}^2 , i a la temperatura efectiva (la que tindria l'objecte si emetés com un cos negre) a la quarta potència, T_{eff}^4 , un retrocés de la fotosfera a lluminositat constant comporta un augment de la temperatura efectiva i, en conseqüència, un corriment de l'emissió cap a energies més grans (*enduriment* de l'espectre). Una prova més d'aquest corriment va ser la detecció d'emissió X tova (és a dir, amb la major part del flux per sota de 0,5 keV) provinent de les noves en fases posteriors a la del màxim ultraviolat. Aquesta emissió es va detectar l'any 1983 a la nova GQ Mus (Nova Muscae 1983), gràcies al satèl·lit europeu EXOSAT, en l'interval 0,04-2 keV, 460 dies després del màxim visual. L'emissió en la banda X de GQ Mus es va detectar també amb el satèl·lit ROSAT (ROentgen SATellite), en el rang 0,1-0,8 keV, nou anys després de l'explosió. La Nova Cygni 1992 també va ser detectada per ROSAT en la banda X tova, però la durada de l'emissió va ser molt més curta (uns 18 mesos). Les observacions en la banda X de les noves en les fases postexplosives han estat crucials per validar el model estàndard de nova i, en particular, l'existència de la fase de lluminositat bolomètrica constant, coincident amb la de caiguda de la lluminositat visual. Cal remarcar, també, que en moltes noves es produeix un màxim d'emissió en l'infraroig posterior a l'ultraviolat. Aquesta emissió està relacionada amb la formació de pols (més afavorida en les noves més lentes), de manera que els grans de pols reradien en la banda infraroja l'energia ultraviolada que reben. De fet, s'ha observat que l'energia que radien en l'infraroig assoleix el mateix valor que el màxim previ en ultraviolat, que era també similar en intensitat al màxim previ en visual.

Durant la fase de lluminositat bolomètrica constant, la part de l'embolcall d'hidrogen que no ha estat ejeccionada per l'explosió continua cremant de manera estacionària. L'energia nuclear alliberada és suficient per mantenir una lluminositat que depèn bàsicament només

de la massa del nan blanc. La lluminositat de les noves en aquesta fase postexplosiva es manté pràcticament constant i igual a la lluminositat d'Eddington. Aquesta lluminositat és aquella per a la qual la força exercida per la radiació, dirigida cap enfora de l'estel, compensa la força gravitatòria, sent, doncs, nulla la força neta sobre una partícula a la superfície de l'estel. La lluminositat d'Eddington depèn linealment de la massa i val al voltant de $5 \cdot 10^4 L_{\odot}$ per a un estel com el Sol.

Una relació empírica important que compleixen moltes noves és la relació entre la magnitud visual en el màxim i el ritme de caiguda de la lluminositat visual: les noves més brillants (de forma absoluta) s'apaguen més de pressa (i per tant tenen t_2 menors) que les noves més dèbils. Aquesta relació s'utilitza per determinar les distàncies de les noves, ja que permet determinar la lluminositat absoluta a partir de la corba de llum (un cop coneguda l'extinció); la diferència entre la lluminositat absoluta i l'aparent (l'observada) permet determinar-ne la distància. També s'ha observat que les noves més ràpides, pel que fa a l'evolució de la corba de llum, són les que presenten velocitats majors d'expansió de l'embolcall.

Els espectres de les noves i la seva evolució temporal després de l'explosió també donen informació important sobre el fenomen. L'evolució espectral de les noves és molt complexa, però es poden establir algunes característiques comunes. Durant la fase premaxim, en què la corba de llum indica la pujada cap al màxim, l'espectre és dominat per línies d'absorció amples, corregudes al blau. Les velocitats deduïdes oscil·len entre uns 100 km/s i uns 1.000 km/s. Quan la nova es troba en el màxim visual, apareix l'anomenat *espectre principal*, on la component de línies d'absorció es fa més prominent i les velocitats deduïdes de les línies són una mica majors. En el mateix màxim o immediatament després apareix una component de línies d'emissió; les línies d'emissió presenten perfils de tipus P Cygni, on la línia d'emissió en té associada una d'absorció correguda cap al blau. Aquests perfils són deguts a la formació de les línies en un embolcall estès en expansió. Les línies més intenses són les d'hidrogen, però també n'hi ha de C, N i O. Algunes de les línies corresponen al rang ultraviolat. Una tercera component, que es pot diferenciar de les presents en l'espectre principal, apareix també poc després del màxim visual i inclou línies d'absorció més amples que les de l'espectre principal, per un factor aproximadament 2, i també amb perfils P Cygni. Aquesta component espectral s'anomena *espectre difús intensificat* (*diffuse enhanced spectrum*, en anglès) i la seva durada oscil·la entre un parell de setmanes i 100 dies, aproximadament. Un quart sistema d'absorció coexisteix amb els anteriors, amb corriments al blau tan grans o més que els anteriors, que poden assolir més de 4.000 km/s. S'anomena *espectre tipus Orion*, per la seva similitud amb

l'espectre d'estels joves massius d'aquesta regió estel·lar. Finalment, es desenvolupa l'anomenat *espectre nebulari*, que és un espectre d'emissió amb línies prohibides d'espècies amb alta ionització, que apareix quan la densitat s'ha reduït suficientment. En aquesta fase espectral les línies prohibides dominen sobre les permeses, i s'originen en la fotoionització de l'embolcall (ejectat i en expansió) per la radiació (ultraviolada) que emet la superfície encara calenta del nan blanc. Les ratlles nebulars apareixen tant en el visible, com en l'ultraviolat i en l'infraroig. No es descarta la presència de xocs en la matèria ejectada que puguin explicar algunes de les ratlles observades en algunes noves. Aquests hipotètics xocs sembla que són els causants de l'emissió X dura observada en algunes noves (en fases molt primerenques o en fases més tardanes, segons els casos).

Estudis espectroscòpics de les noves permeten determinar la composició de la matèria ejectada i han posat en evidència diversos fets importants: la concentració dels nuclis de C, N i O és gran (major que la solar), en molts casos hi ha enriquiments en Ne i també en elements més pesants com ara el Mg i el Al.

Explosió a la superfície d'un nan blanc en un sistema binari

Origen dels estels nans blancs

Els nans blancs representen els últims estadis de l'evolució estel·lar, ja que constitueixen el destí final de la majoria dels estels. Són estels degenerats, ja que l'equació d'estat (relació entre pressió, densitat i temperatura) que governa el seu interior és la d'un gas d'electrons degenerat. Aquesta situació es produeix quan la densitat del material és prou elevada perquè l'energia de Fermi dels electrons sigui de l'ordre de kT (k és la constant de Boltzmann), cosa que fa que la pressió del gas depengui bàsicament de la densitat i sigui quasi independent de la temperatura. La composició química dels nans blancs pot ser d'heli (He), de carboni i oxigen (CO) o d'oxigen i neó (ONe), segons quina sigui la massa inicial de l'estel progenitor del nan blanc.

L'interval de masses $0,7 \lesssim M/M_{\odot} \lesssim 2,3$ (M_{\odot} és la massa del Sol) dona com a producte final o bé un nucli degenerat d'heli, produït com a conseqüència de la combustió de l'hidrogen, o bé un nucli degenerat de carboni i oxigen, resultat de la combustió de l'heli. La fase de combustió central de l'hidrogen és la primera fase de combustió termonuclear per la que passen tots els estels i s'anomena *fase de seqüència principal* i és la més llarga de la vida dels estels. El Sol es troba en aquesta fase (que en el seu cas té una durada total de 10^{10} anys, dels quals ja n'han transcorregut la meitat aproximadament). La combustió de l'heli a carboni i oxigen es produeix mitjançant la reacció anomenada *triple alfa*, que transforma tres nuclis d'heli (partícules alfa) en un de carboni, seguida parcialment de la captura d'un nucli

d'heli pel carboni, donant oxigen.² Que el resultat final sigui un nan blanc d'heli o de carboni i oxigen depèn de la fase evolutiva en què es produeix la pèrdua de massa. Si l'evolució és en un sistema binari i aquest és prou compacte (és a dir, la separació entre els dos estels és prou petita), el progenitor del nan blanc pot perdre massa quan encara no s'ha cremat l'heli al seu interior, amb la qual cosa deixa un nucli degenerat d'heli i el resultat final és un nan blanc d'aquesta composició química. Si la pèrdua de massa té lloc en la fase posterior en què l'heli ja s'ha cremat, l'estel degenerat resultant serà un nan blanc de carboni i oxigen. És important destacar que si no és en un sistema binari, la formació d'un nan blanc d'heli requereix un temps més llarg que l'edat de l'Univers (i pot produir-se també per a masses inferiors a la del progenitor, $0,1 \lesssim M/M_{\odot} \lesssim 0,7$).

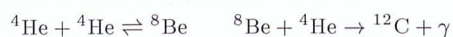
En el cas de masses inicials $2,3 \lesssim M/M_{\odot} \lesssim 8$, la combustió de l'hidrogen en la fase seqüència principal deixa un nucli no degenerat d'heli (perquè, en aquest cas, en ser la massa inicial major, l'estel no assoleix densitats tan altes com en el cas de $M \lesssim 2,3 M_{\odot}$ i no arriba a l'estat de degeneració electrònica tan aviat). La fase evolutiva posterior, de combustió de l'heli, porta a un nucli degenerat de carboni i oxigen. En conseqüència, el destí final dels estels en aquest interval de masses és un nan blanc de carboni i oxigen.

Finalment, per a masses de l'estel progenitor del nan blanc $8 \lesssim M/M_{\odot} \lesssim 10-12$, es produeix una fase de combustió del carboni no explosiva, que dona lloc a un romanent estellar degenerat ric en oxigen i neó (nan blanc d'ONe). Tots els valors esmentats com a límits inferiors i superiors de cada interval són aproximats i no estan completament ben establerts per la teoria de l'evolució estellar.

Nans blancs en sistemes binaris

L'evolució d'un nan blanc en un sistema binari compacte (és a dir, amb una distància prou petita entre els dos estels perquè hi hagi interacció entre ells) és molt diferent de la d'un nan blanc aïllat. Quan el nan blanc és aïllat, el seu únic destí possible és anar refredant-se mitjançant l'alliberament de la seva energia interna, amb la consegüent disminució de lluminositat. En canvi, si el nan blanc es troba en un sistema binari compacte, pot rebre matèria provinent del seu company. En aquest cas, és possible que es desestabilitzi en forma d'explosió de nova o de supernova del tipus Ia. El mecanisme que desencadena qualsevol dels dos tipus d'explosió està relacionat amb la combustió termonuclear, però el tipus de material cremat per aquesta combustió i la fracció de l'estel que en resulta afectat són molt diferents en un cas i en l'altre. En les supernoves del tipus Ia, la combustió

²La reacció triple alfa es produeix en dues etapes:



explosiva del carboni és la que desencadena l'explosió, que afecta tot el nan blanc. En canvi, en les noves és la combustió de l'hidrogen a la superfície la responsable directa de l'explosió. Val a dir que no sempre el destí final dels nans blancs sotmesos a acreció de matèria en sistemes binaris és una explosió, ja que també pot passar que hi hagin o bé petites erupcions o bé combustió estacionària de l'hidrogen a la superfície de l'estel, que no arribin a donar una explosió (és a dir, que no representin un gran augment de lluminositat i una pèrdua apreciable de massa). En alguns d'aquests casos es pot produir el que s'anomena *collapse induït per acreció*, en què el nan blanc es comprimeix molt a causa de l'acreció, però sense explotar, i acaba com un estel de neutrons (en què els nuclis dels ions s'han desfet completament i els protons i electrons han format neutrons).

Els nans blancs que donen lloc a explosions de noves es troben en sistemes binaris anomenats *variables cataclísmiques*, on l'estel company és un estel de la seqüència principal que omple el seu lòbul de Roche (regió on domina el camp gravitatori del mateix estel) i comença a transferir matèria al nan blanc a través de l'anomenat punt de Lagrange L_1 del sistema. Com a resultat, es genera un disc de material (anomenat *disc d'acreció*) que, provinent de l'estel company, orbita el nan blanc (vegeu la figura 2). Per diferents processos dissipatius, el material del disc (bàsicament de composició solar) perd moment angular i acaba caient sobre la superfície del nan blanc.

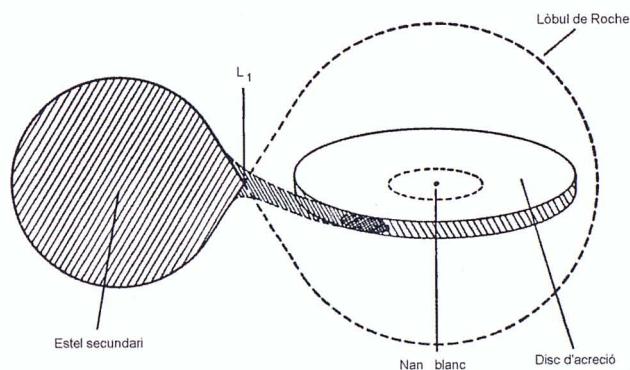


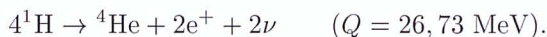
Figura 2: Variable cataclísmica on s'observa un nan blanc envoltat d'un disc d'acreció, format a partir de la matèria que ha desbordat el lòbul de Roche del company (estel secundari)

L'acumulació de material comporta un augment de la seva densitat (que típicament assoleix valors de l'ordre de $10^3-10^4 \text{ g cm}^{-3}$), procés que condueix alhora a un augment de la temperatura d'aquest embolcall. En aquestes condicions d'elevada densitat, el material és degenerat i això fa que l'estel no respongui als increments de temperatura com faria si es comportés com un gas ideal (cas aquest últim en què, amb vista a restablir

l'equilibri hidrostàtic, un augment de temperatura comporta l'expansió de l'estel per reduir la pressió). Així, en els embolcalls degenerats de les noves la transferència de matèria des del disc d'acreció fa que, ràpidament, s'assoleixin temperatures prou elevades (típicament entre 10^7 K i $2 \cdot 10^7$ K) perquè s'iniciïn les reaccions de fusió termonuclear de l'hidrogen, sense que la resta de l'estel reaccionï. L'inici de les reaccions de fusió allibera una gran quantitat d'energia que provoca un augment de la temperatura de l'embolcall, i que alhora dispara el ritme amb què es produeixen les reaccions de fusió, en un procés autoaccelerat. Com a resultat, es produeix una allau tèrmica, coneguda com a *allau termonuclear* (*ThermoNuclear Runaway*, TNR, en anglès), que acaba amb l'expulsió a gran velocitat d'una fracció important de l'embolcall (o de tot) prèviament acretat sobre el nan blanc.

Per què exploten les noves? El model termonuclear

L'inici d'aquesta allau tèrmica, a temperatures al voltant de 10^7 K, està dominat per les reaccions de fusió de l'hidrogen a través de les anomenades cadenes protó-protó (pp), un dels possibles modes de fusió de l'hidrogen.³ El conjunt de reaccions nuclears que defineixen les cadenes pp (vegeu la figura 3) correspon globalment a la fusió de quatre protons que genera un nucli d'heli (^4He), dos positrons (e^+) i dos neutrins (ν), amb l'alliberament de 26,73 MeV (incloent l'energia que s'enduen els neutrins emesos, que depèn del camí concret seguit per les reaccions):



En aquestes fases inicials de l'explosió, les cadenes dominants són la fusió de dos protons per generar deuteri, $^1\text{H}(p, e^+ \nu)^2\text{H}$, seguida de la fusió d'un nucli de deuteri i un protó, que donen lloc a un nucli de ^3He , $^2\text{H}(p, \gamma)^3\text{He}$.⁴ Evidentment, la primera reacció inclou una desintegració β^+ , ja que un protó s'ha convertit en un neutró, emetent un positró i un neutrí, a més d'alliberar la corresponent energia. La fusió del ^3He es du a terme mitjançant dues vies possibles, però majoritàriament mitjançant $^3\text{He}(^3\text{He}, 2p)^4\text{He}$, és a dir, fusionant dos nuclis de ^3He i generant ^4He . Tanmateix, la via marginal a través de $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$, i la seva transformació posterior per via de la captura electrònica $^7\text{Be}(e^-, \nu)^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$, ofereix un camí interessant per a

³Bethe i von Weizsäcker, als anys trenta, van establir que hi havia dos mecanismes bàsics per a la conversió de l'hidrogen en heli i per proveir els estels de prou energia per radiar amb les lluminositats observades: les cadenes pp i el cicle CN. Anys més tard es van descobrir extensions del cicle CN, que s'anomenen cicles CNO.

⁴Les reaccions nuclears se simbolitzen com a $A(b,c)D$, equivalent a



la síntesi de ^7Li en les explosions de noves (vegeu la figura 3 i més endavant).

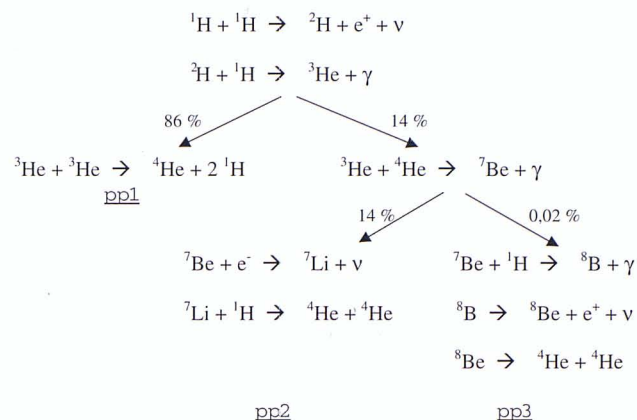


Figura 3: Cadenes protó-protó de combustió de l'hidrogen, on quatre protons es converteixen en un nucli de ^4He . Els percentatges de cada cadena estan avaluats per a condicions solars

Hi ha una segona via per a la transmutació de l'hidrogen en heli: l'anomenat *cicle CNO*, que requereix la presència de nuclis catalitzadors de carboni i nitrogen, bàsicament, però també d'oxigen (vegeu la figura 4). Aquesta presència està garantida en el cas de les noves (encara que amb grau variable), gràcies a la composició química del material acretat (que, en principi, se suposa solar) i, sobretot, a la barreja amb les capes més externes del nan blanc que es creu que es produeix durant la fase prèvia a l'explosió. L'efecte bàsic del cicle CNO, com el de les cadenes pp, és la producció d'un nucli de ^4He a partir de la fusió de quatre protons, amb l'alliberament d'energia (26,73 MeV), i l'emissió de dos positrons i dos neutrins. Dos temps característics nuclears tenen un paper molt important en l'evolució: el temps característic de les desintegracions β , τ_{β^+} , que només depèn de les propietats del nucli radioactiu corresponent (vida mitjana), i el temps característic de les reaccions de captures de protons (p, γ), $\tau_{(p, \gamma)}$, que per a totes les reaccions d'aquest tipus depèn molt fortament de la temperatura. Durant les fases inicials de l'explosió, $\tau_{\beta^+} \ll \tau_{(p, \gamma)}$; això fa que el cicle CNO operi sense problemes i que la fusió termonuclear de l'hidrogen vingui dominada per $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}(\beta^+)^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$, on el terme β^+ correspon a la desintegració del nucli de ^{13}N , que dona ^{13}C . El cicle es tanca per mitjà de $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}(\beta^+)^{15}\text{N}(p, \alpha)^{12}\text{C}$ (vegeu la figura 4). Globalment, en el procés s'han capturat quatre protons i s'ha emès un nucli de ^4He , i es manté el nombre de nuclis de ^{12}C .

La fase inicial de l'explosió està absolutament dominada per la transferència de material sobre la superfície del nan blanc, l'acreció. Tanmateix, quan la temperatura a la base de l'embolcall acretat assoleix aproximadament uns $2,5 \cdot 10^7$ K, l'evolució de l'embol-

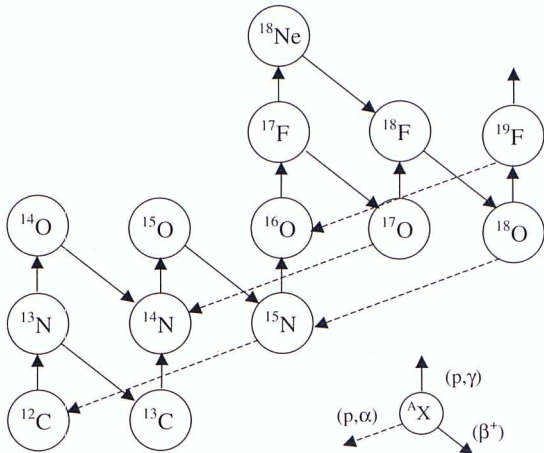


Figura 4: Cicles CNO de combustió de l'hidrogen

call és dominada per les reaccions nuclears (el temps característic nuclear esdevé més curt que el temps característic d'acreció de matèria). L'embolcall ha assolit, doncs, la seva massa gairebé definitiva (aproximadament 10^{-4} - $10^{-5} M_{\odot}$), atès que la transferència posterior de material és pràcticament negligible en la curta escala temporal de les reaccions nuclears dominants.

La forta dependència de les reaccions nuclears en la temperatura fa que la zona on predominantment té lloc la fusió nuclear, l'anomenada *capa de combustió*, sigui una regió molt estreta ubicada a la base de l'embolcall, just a la interfície entre l'embolcall i les regions més externes del *nucli* del nan blanc. Conjuntament amb l'inici de les reaccions nuclears es produeix un fenomen d'importància vital per entendre la física de les explosions de noves: just al damunt de la posició que ocupa la capa de combustió, comença a aparèixer transport d'energia per convecció que, ràpidament i acompanyant el desenvolupament de l'explosió, es propaga fins a la superfície de l'estel. De fet, quan la temperatura de la capa de combustió assoleix uns $5 \cdot 10^7$ K, la convecció s'estén ja a una regió d'uns 100 km per sobre de la capa de combustió. En aquests moments, l'alliberament d'energia per reaccions nuclears està pràcticament dominat pel cicle CNO, on, a més de les reaccions esmentades anteriorment, apareixen per primer cop reaccions d'un dels cicles secundaris: en particular, $^{16}\text{O}(p,\gamma)^{17}\text{F}(\beta^+)^{17}\text{O}(p,\alpha)^{14}\text{N}$ (vegeu la figura 4). De fet, la major barrera de potencial coulombiana que presenta el ^{16}O (enfront, per exemple, del ^{12}C), requereix més energia cinètica —més temperatura— per produir la fusió termonuclear amb protons.

Quan la temperatura ha assolit 10^8 K, poc més d'una setmana de temps després que la temperatura a la capa de combustió fos $3 \cdot 10^7$ K, la convecció s'ha estès ja a tot l'embolcall (amb un temps característic de barreja del material inferior a un segon). Pel que fa als temps ca-

racterístics esmentats abans, ara comença a passar que $\tau_{\beta^+} \gtrsim \tau_{(p,\gamma)}$, a causa de l'alt valor de la temperatura; això fa que els elements radioactius com el ^{13}N esdevinguin molt abundants perquè no poden desintegrar-se. En aquest cas es diu que el cicle CNO està *β -limitat* (també s'anomena cicle CNO calent), ja que hi ha un "coll d'ampolla" associat amb les desintegracions β que no poden produir-se.

Juntament amb les reaccions del cicle CNO, per a aquestes temperatures comença una notable activitat nuclear que s'estén a nuclis cada vegada més pesants. En particular, els anomenats cicles secundaris neó-sodi, NeNa, i magnesi-alumini, MgAl (vegeu la figura 5), vinculats a la producció de dos elements radioactius, ^{22}Na i ^{26}Al , de gran rellevància per a l'astronomia gamma (vegeu més endavant).

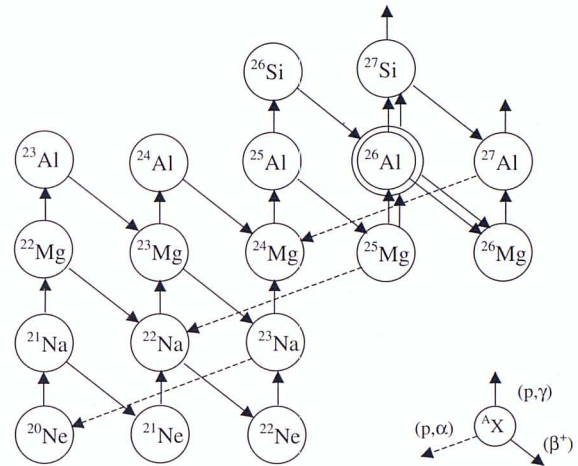


Figura 5: Cicles Ne-Na i Mg-Al

Poc després del moment en què la temperatura era 10^8 K a la capa de combustió, a penes un minut, l'embolcall assoleix la seva temperatura màxima, típicament entre 2 i $3,5 \cdot 10^8$ K, en funció de la massa del nan blanc i de la composició química de l'embolcall. En aquestes condicions, i a diferència del que succeeix amb el cicle CNO, els cicles NeNa i MgAl no es tanquen i experimenten importants fuites cap a elements més pesants, fonamentalment a través de reaccions de captura de protons sobre els isòtops ^{27}Si i ^{27}Al , responsables de la síntesi de sofre, argó i altres espècies durant les explosions de noves.

És important destacar que, habitualment, les explosions generades en embolcalls estel·lars s'aturen, bé per haver consumit tot el combustible nuclear, bé per expansió de l'embolcall. En el cas de les noves, la degeneració de la matèria fa que l'expansió de l'embolcall no es produeixi massa aviat i pari l'allau tèrmica: el temps característic nuclear és bastant menor que el temps dinàmic de resposta de l'embolcall, i fa que l'expansió no es produeixi directament com a conseqüència de l'escalfament. Tal com van apuntar Starrfield *et al.*

	H	He	C	N	O	Ne	Na-Fe	Z
V693 CrA 1981								
Vanlandingham et al. 1997	0,25	0,43	0,025	0,055	0,068	0,17	0,058	0,32
Model ONe ($1,15M_{\odot}$)	0,30	0,20	0,051	0,045	0,15	0,18	0,065	0,50
Andreä et al. 1994	0,16	0,18	0,0078	0,14	0,21	0,26	0,030	0,66
Model ONe ($1,15M_{\odot}$)	0,12	0,13	0,049	0,051	0,28	0,26	0,10	0,75
Williams et al. 1985	0,29	0,32	0,0046	0,080	0,12	0,17	0,016	0,39
Model ONe ($1,25M_{\odot}$)	0,28	0,22	0,060	0,074	0,11	0,18	0,071	0,50
QU Vul 1984								
Saizar et al. 1992	0,30	0,60	0,0013	0,018	0,039	0,040	0,0049	0,10
Model ONe ($1,0M_{\odot}$)	0,47	0,28	0,041	0,047	0,037	0,090	0,0035	0,25
V1688 Cyg 1978								
Stickland et al. 1981	0,45	0,23	0,047	0,14	0,13	0,0068		0,32
Model CO ($0,8M_{\odot}$)	0,51	0,21	0,048	0,096	0,13	0,0038	0,0015	0,28

Taula 1: Comparació entre abundàncies teòriques i observades (en fraccions de massa) per algunes noves (José i Hernanz, 1998)

en els anys setanta, el mecanisme essencial en les noves és la instauració de la convecció, responsable del transport a les regions més externes i fredes d'una fracció apreciable de nuclis, de vida mitjana curta, sintetitzats a la capa de combustió durant l'explosió, com ara el ^{14}O , ^{15}O i ^{17}F ; d'aquesta manera, se n'evita la destrucció per captures de protons, ja que aquestes requereixen temperatures més elevades (Starrfield, 1989). En pocs minuts, es desintegren i alliberen una quantitat d'energia important, part de la qual s'inverteix en energia cinètica de l'embolcall, que acaba sent ejectat a gran velocitat (típicament uns quants milers de km/s). Sense el transport convectiu d'aquests nuclis, és impossible reproduir les fases finals de l'explosió d'una nova i, en particular, l'ejecció de l'embolcall.

Síntesi d'elements químics a les noves

Influència en l'evolució química de la Galàxia

Un dels resultats d'observació més rellevants és la constatació que les explosions de noves ejecten al medi interestel·lar una certa quantitat de massa apreciablement enriquida amb elements de massa intermèdia (del carboni a l'alumini), fruit dels processos nuclears que s'han produït a l'embolcall durant l'explosió (Gehrz *et al.*, 1998). Aquest fet, reflectit a la taula 1 (que alhora permet ressaltar una notable coincidència entre les abundàncies observades en diverses noves i les obtingudes mitjançant simulació)⁵ ha despertat l'interès a esbrinar el paper que tenen les explosions de noves en la síntesi dels elements químics que es troben a la Galàxia. La massa total ejectada al medi interestel·lar per les no-

ves durant la vida de la Galàxia es pot estimar mitjançant el producte entre el ritme d'explosions de nova a la Galàxia (estimat en unes 30 per any), l'edat de la Galàxia (uns 10.000 milions d'anys) i la massa mitjana ejectada durant una explosió de nova (al voltant de $2 \cdot 10^{-5}$ masses solars). El resultat, uns sis milions de masses solars, correspon només a una petita fracció del contingut de gas i pols de la Galàxia, aproximadament un 1/3.000. Aquesta estimació en ordre de magnitud suggereix que, malgrat el nombre considerable d'explosions de noves que es donen a la Galàxia per any, aquestes no constitueixen les fonts principals d'enriquiment de les abundàncies galàctiques, en comparació amb altres fonts, com ara les supernoves. No obstant això, les noves poden tenir un paper destacat en la producció d'algunes espècies nuclears, en particular, aquells isòtops sobreproduïts amb relació a les abundàncies solars per factors de l'ordre de 1.000 o més. Tal com es mostra a les figures 6 i 7, les noves ejecten grans quantitats de ^{13}C , ^{15}N i ^{17}O , en alguns casos sobreproduïts més de 10.000 vegades amb relació als nivells solars. Una estimació simple de la incidència de les explosions de nova en la síntesi d'aquests isòtops mostra que les noves en podrien constituir la font principal de producció (tot i que en el cas del ^{15}N caldria invocar algun escenari astrofísic addicional per donar compte de les elevades abundàncies galàctiques). En el cas de les noves de CO, se sobreproduïx també el ^7Li . En el cas de les noves de ONe, el ^7Li ja no és tan sobreproduït però, en canvi, hi ha elements al voltant del neó amb grans abundàncies, d'acord amb les observacions d'una gran part (al voltant del 30%) de les noves (vegeu alguns exemples a la taula 1). Finalment, per a una nova de ONe de massa $1,35 M_{\odot}$, elements molt pesants (com ara el sofre) es produeixen en quantitats apreciables, a causa de les altes temperatures assolides a la capa de combustió, que permeten les fuites dels cicles NeNa i MgAl; això permet

⁵A la taula 1 es comparen les abundàncies determinades a partir d'anàlisis espectroscòpiques fetes per diversos autors, amb models teòrics. Malgrat algunes discrepàncies, es veu que els models teòrics poden reproduir moltes de les abundàncies observades, atès que l'error en les determinacions de les observacions és bastant gran en alguns casos.

explicar les abundàncies observades en algunes noves.

Una implicació interessant que deriva de l'estudi dels nivells de producció de carboni, nitrogen i oxigen en les explosions de nova, és el fet que els quocients O/N i C/N mostren una clara tendència a disminuir quan la massa del nan blanc on té lloc l'explosió augmenta. Aquest fet proporciona una eina per estimar, de manera indirecta, la massa del nan blanc (Kovetz i Prialnik, 1997; José i Hernanz, 1998): la causa és que per masses majors la temperatura assolida és major i, en conseqüència, més C passa a N i més O passa a N.

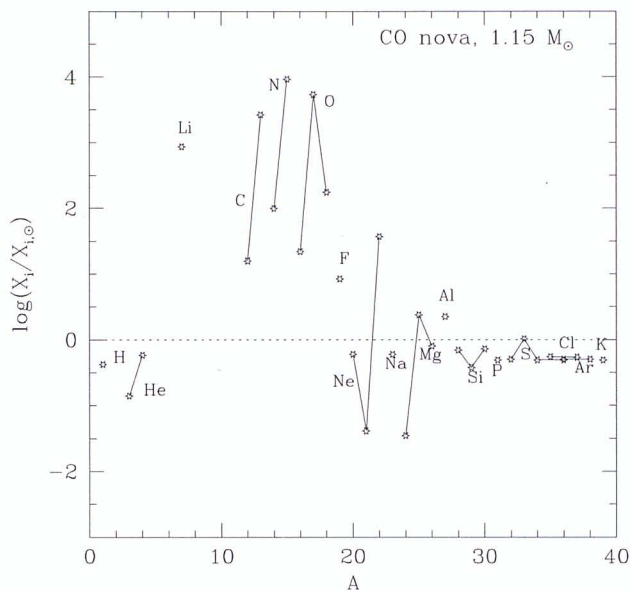


Figura 6: Sobreproduccions respecte a les abundàncies solars dels isòtops sintetitzats a una nova de CO, de massa 1,15 M_⊙, en funció del nombre màssic A. La sobreproducció d'un isòtop és el logaritme decimal del quocient entre la fracció en massa produïda i el valor solar de la fracció en massa del mateix isòtop, sent el valor solar el deduït a partir de les observacions de la superfície del Sol (i, per tant, representatiu dels estels contemporanis del Sol). La línia horitzontal representa, doncs, les abundàncies solars. Destaquen les sobreproduccions de ⁷Li, ¹³C, ¹⁵N i ¹⁷O

Elements radioactius: importància per a l'emissió gamma de les noves

Un grup important d'elements sintetitzats a les noves és el dels elements radioactius amb vides mitjanes intermèdies o llargues, com ara ¹³N, ¹⁸F, ⁷Be, ²²Na, ²⁶Al (vegeu la taula 2). Aquests elements no són crucials per a l'explosió en si mateixa, ja que la seva vida mitjana és massa llarga (si es compara amb la dels elements abans esmentats, ¹⁴O, ¹⁵O i ¹⁷F, que tenen vides mitjanes de l'ordre de 100 s), però sí que ho són per a l'emissió que produeixen en el rang gamma d'energia. L'origen d'aquesta emissió és doble: d'una banda es produeix l'anihilació dels positrons resultants de la desintegració β⁺ del ¹³N i del ¹⁸F amb els electrons lliures de l'embolcall

en expansió. Aquesta anihilació té com a conseqüència la producció de fotons a energies de 511 keV (línia) i per sota (continuu associat amb la degradació d'energia que pateixen els fotons, que s'anomena *comptonització* perquè és deguda a l'efecte Compton). D'altra banda, els elements ⁷Be, ²²Na i ²⁶Al emeten fotons dins del rang gamma en desintegrar-se (vegeu la taula 2). Cal recalcar que el ²⁶Al és un cas a part, ja que no es pot observar en noves individuals pel fet que el temps típic entre dues erupcions successives és molt més curt que la seva vida mitjana; per tant, només té sentit parlar de l'emissió acumulada per les erupcions de moltes noves (i per altres estels productors de ²⁶Al). Aquesta emissió, a 1.809 keV, s'ha detectat a la Galàxia gràcies a l'instrument COMPTEL (sigles de COMPTon TELEscope) del satèl·lit CGRO (Compton Gamma-Ray Observatory). El seu origen encara és controvertit, però sembla que està més aviat associat amb estels de població jove que amb estels de població vella com ara les noves; de tota manera, encara no s'ha descartat que les noves puguin contribuir a l'emissió a 1.809 keV galàctica.

Cal mencionar que el ⁷Be és un element radioactiu que se sintetitza a les noves i que té interès doble. En primer lloc, el ⁷Be és emissor de radiació gamma (línia a 478 keV; vegeu la taula 2). En segon lloc, el ⁷Be produeix ⁷Li en desintegrar-se; per tant, les noves contribueixen a l'enriquiment en ⁷Li de la Galàxia, cosa interessant ja que l'origen d'aquest element és encara incert. S'ha atribuït parcialment a diversos escenaris astrofísics (des del Big-Bang, a reaccions d'espallació produïdes per raigs còsmics fins a fonts estel·lars diverses). Els nostres estudis (Hernanz *et al.*, 1996) indiquen que les noves podrien arribar a contribuir en un ≈15% al ⁷Li galàctic, sent les de CO les que més en produeixen (vegeu les figures 6 i 7).

Pel que fa al ²²Na, la seva vida mitjana és tal que l'emissió a 1.275 keV fruit de la seva desintegració és potencialment detectable tant en noves individuals com per l'acumulació de moltes explosions. Malgrat els intents continuats de detecció mitjançant l'instrument COMPTEL del satèl·lit CGRO, que encara continuen, aquesta línia encara no s'ha detectat mai ni en noves particulars ni de manera distribuïda a la Galàxia. En el cas del ²²Na, la detecció seria molt important per validar la teoria de les noves, ja que aquest element és produït sobretot en aquests objectes, al contrari del que passa amb el ²⁶Al.

El tipus particular de nova té molta importància a l'hora de determinar-ne la nucleosíntesi i, en particular, la producció d'elements radioactius. Així doncs, les noves de CO són les principals productores de ⁷Be, mentre que les de ONe són les que sintetitzen tant ²²Na com ²⁶Al (José i Hernanz, 1998). El ¹³N i el ¹⁸F es produeixen de manera similar en ambdós tipus de noves. En conseqüència, l'espectre en el rang gamma tant de

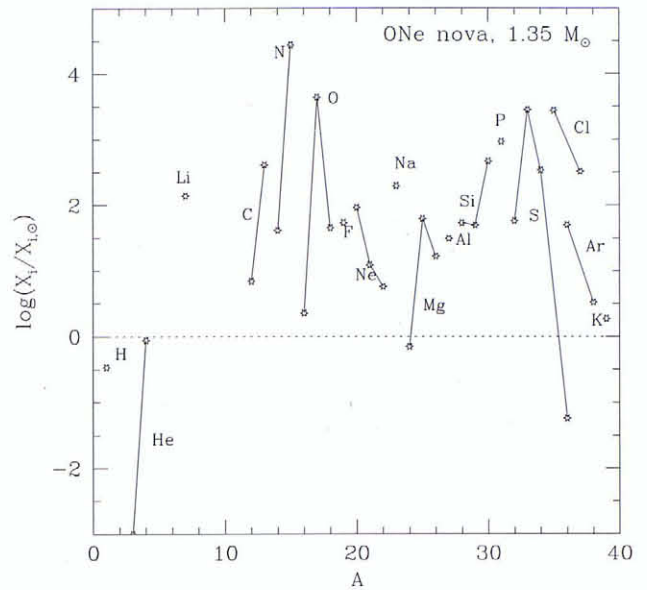
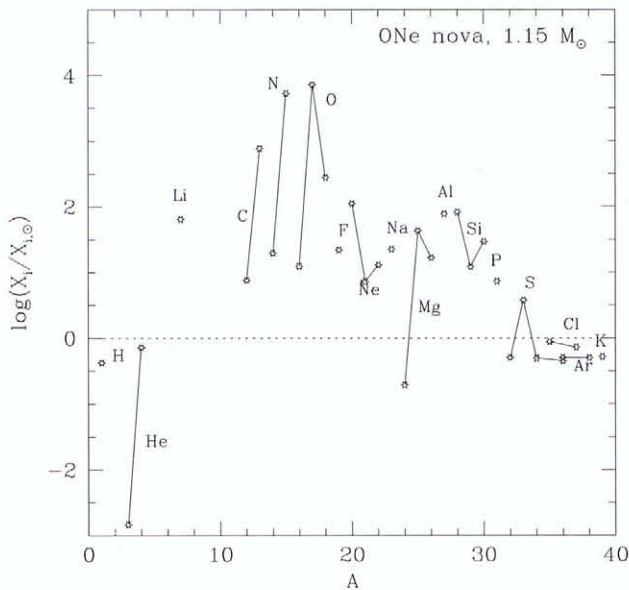


Figura 7: Sobreproduccions respecte a les abundàncies solars per a dues noves de ONe; per a la de massa $1,15 M_{\odot}$ s'observa una menor sobreproducció de ${}^7\text{Li}$ i una major d'elements al voltant del neó, alumini i silici; per a la de massa $1,35 M_{\odot}$ destaca la sobreproducció d'alguns elements pesants, com ara el sofre

Isòtop	Vida mitjana	Línia	Procés de desintegració
${}^{13}\text{N}$	862 s	511 keV	desintegració β^+
${}^{18}\text{F}$	158 min	511 keV	desintegració β^+
${}^7\text{Be}$	77 dies	478 keV	captura e^-
${}^{22}\text{Na}$	3,75 anys	1.275 keV & 511 keV	desintegració β^+
${}^{26}\text{Al}$	10^6 anys	1.809 keV & 511 keV	desintegració β^+

Taula 2: Propietats d'alguns isòtops radioactius sintetitzats en noves

les noves de CO com de les de ONe presenta la línia de 511 keV i el continu per sota d'aquesta energia (vegeu abans). Aquesta emissió és de curta durada (1-2 dies), perquè les vides mitjanes del ${}^{13}\text{N}$ i del ${}^{18}\text{F}$ són molt curtes. En canvi, la línia de 478 keV relacionada amb la desintegració del ${}^7\text{Be}$ només es pot esperar de manera apreciable en les noves de CO (amb durada d'un parell de mesos). Pel que fa a la línia de 1.275 keV relacionada amb la desintegració del ${}^{22}\text{Na}$, només és esperable en les noves de ONe, i té una durada d'uns 2 anys. L'observació de l'emissió gamma de les noves, per tant, permetria diagnosticar de manera clara el tipus de nova i la nucleosíntesi concreta que s'hi ha produït, ja que revela directament els processos de desintegració dels elements radioactius visibles quan l'embolcall en expansió és prou transparent a la radiació (Gómez-Gomar et al., 1998). És per això que actualment treballem en la predicció del senyal gamma emès per les noves i en la seves possibilitats de detecció amb els instruments actuals, com per exemple COMPTEL i BATSE, del CGRO, i futurs, com l'SPI (SPECTrometer for INTEGRal) del satèl·lit INTEGRAL (INTERNational Gamma-RAY Laboratory) de l'ESA,

que serà llançat el 2001.

Referències

- GEHRZ, R. D., TRURAN, J. W., WILLIAMS, R. E. i STARRFIELD, S., Nucleosynthesis in Classical Novae and Its Contribution to the Interstellar Medium, *Pub. Astron. Soc. of the Pacific*, **110**, 3 (1998).
- GÓMEZ-GOMAR, J., HERNANZ, M., JOSÉ, J. i ISERN, J., Gamma-ray emission from individual classical novae, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **296**, 913 (1998).
- HERNANZ, M., JOSÉ, J., COC, A. i ISERN, J., On the synthesis of ${}^7\text{Li}$ and ${}^7\text{Be}$ in novae, *Astrophys. J.*, **465**, L27 (1996).
- JOSÉ, J. i HERNANZ, M., Nucleosynthesis in classical novae: CO versus ONe white dwarfs, *Astrophys. J.*, **494**, 680 (1998).
- KOVETZ, A. i PRIALNIK, D., The composition of nova ejecta from multicycle evolution models, *Astrophys. J.*, **477**, 356 (1997).
- STARRFIELD, S., a *Classical Novae*, eds. M. F. Bode i A. Evans, pàg. 39 (1989).