

La colosal muerte de las supernovas

La frecuencia en la formación y destrucción de las estrellas es crucial en la evolución fisicoquímica de las galaxias. De los restos de supernova nacerán otras estrellas y planetas tan complejos químicamente como el Sol y la Tierra.

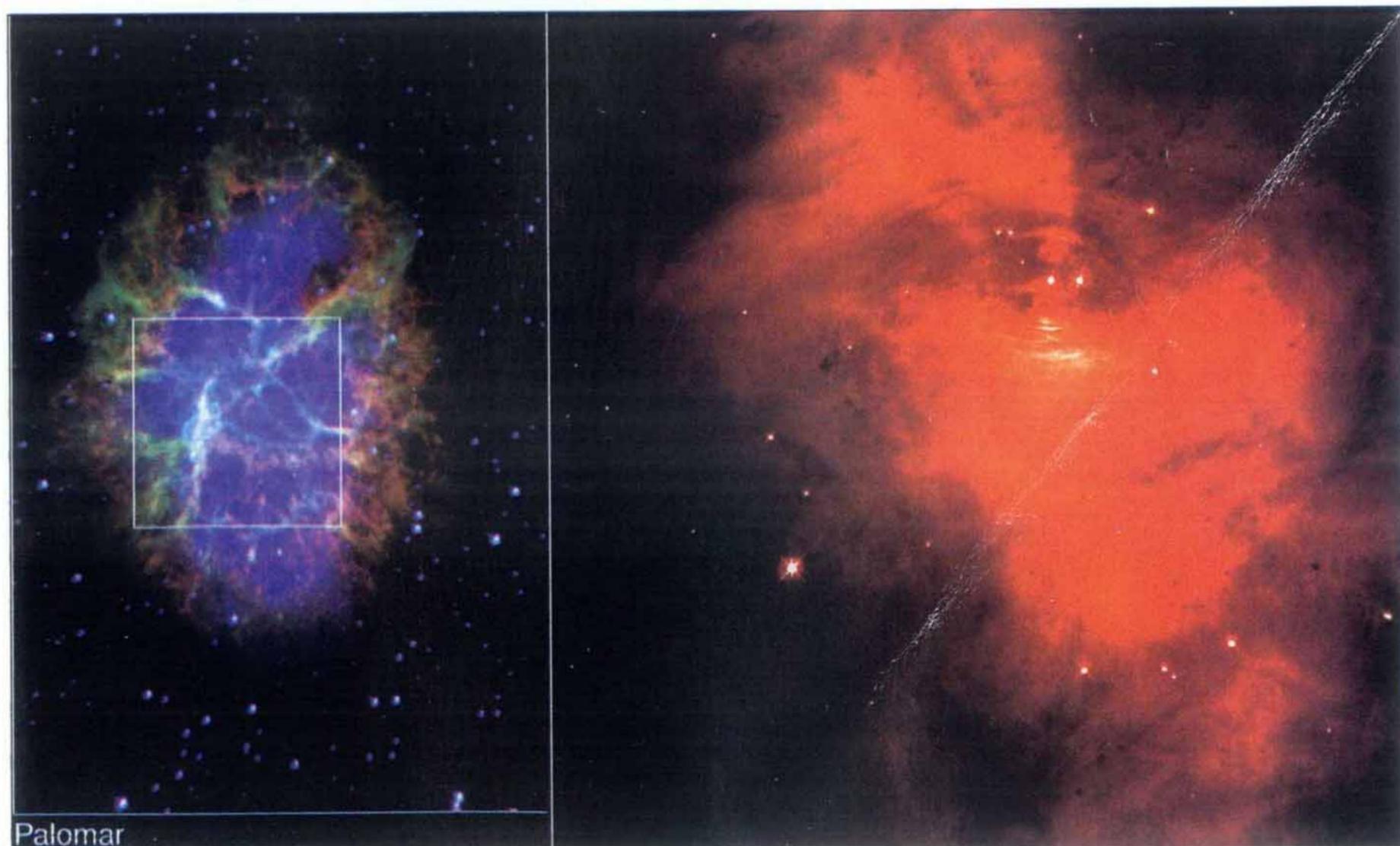
Josep M^a Trigo,
astrofísico, Dpto. de
Astronomía, Universidad
de Valencia y Dpto. Ciencias
Experimentales,
Universidad Jaume I.

La aparición en el cielo de estrellas nuevas, algunas luciendo con extraordinaria profusión durante pocas semanas, siempre ha intrigado a los observadores del cielo, desde la remota antigüedad. Los avances acaecidos en astrofísica en las últimas décadas están permitiendo interpretar correctamente estos fenómenos. Hoy en día sabemos que la mayoría de estos intensos flashes de luz corresponden a los últimos estertores en la vida de estrellas más grandes que el Sol que acaban sus días en una brutal explosión denominada Supernova.

En el año 1054 en la constelación de Tauro los astrónomos chinos recogieron la aparición de una brillante estrella, justo en la misma zona donde hoy se puede observar una espectacular nebulosa denominada del Cangrejo por una estructura entrelazada que recuerda vagamente estas criaturas. Más tarde

otras supernovas históricas fueron las observadas por Tycho Brahe en 1572 y por Kepler en 1604.⁽¹⁾ La estadística sigue jugando desde entonces una mala pasada y, pese a que sería previsible contemplar una tan cercana como éstas cada pocos siglos, todavía la tecnología actual no ha podido emplearse a fondo. A pesar de ello, en las últimas décadas ha habido importantes eventos de este tipo. Dos de ellos aparecieron en la galaxia satélite de la Vía Láctea conocida como Gran Nube de Magallanes (la SN 1987A) o en la galaxia M81 (la SN

Figura 1. Nebulosa del Cangrejo, restos de una explosión supernova acaecida en 1054, registrada por astrónomos chinos. La imagen de la izquierda fue tomada desde Tierra en el Observatorio Palomar, la zona recuadrada ha sido ampliada a la derecha por el Telescopio Espacial Hubble (HST/NASA)



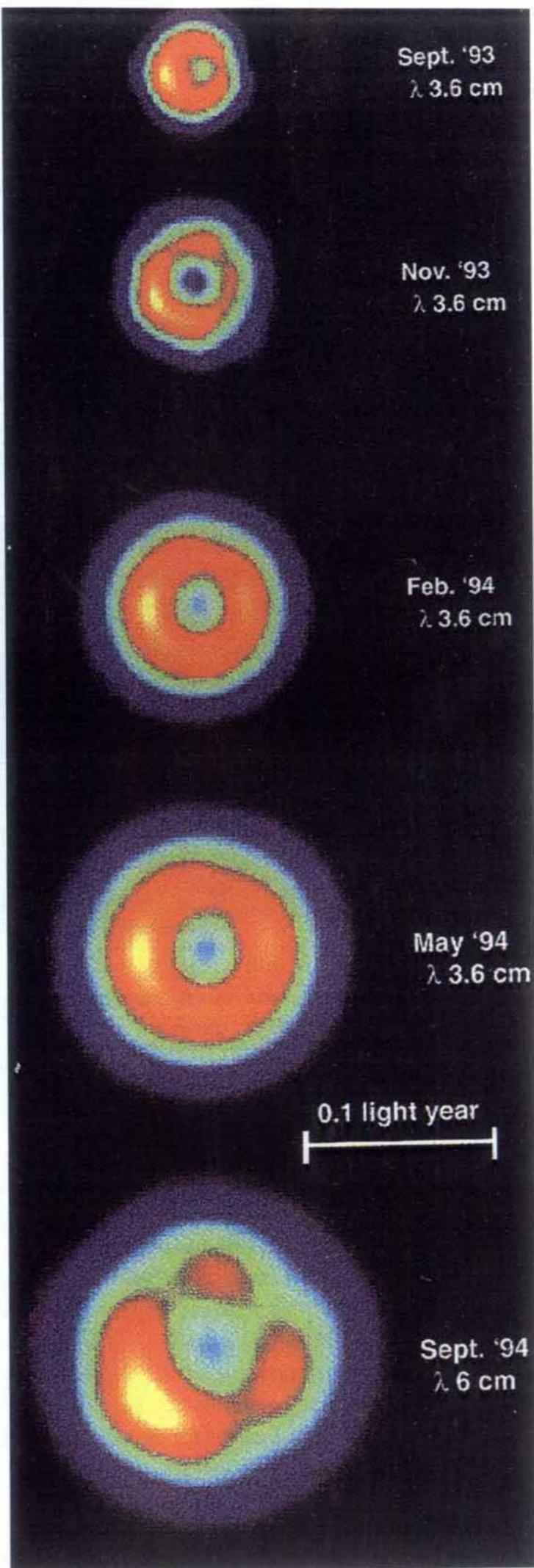


Figura 2. La primera secuencia expansiva de una supernova fue obtenida de SN 1993J con radiotelescopios distanciados usando una técnica denominada Interferometría de muy Larga Base. El grupo interdisciplinar estuvo dirigido por el Dr. Juan María Marcaide (Universidad de Valencia).

Imagen cortesía del autor.

1993J). Ésta última pudo ser estudiada con gran detalle desde sus primeros momentos gracias a ser descubierta por el aficionado lucense Francisco García.

Pero el interés de estudiar estos fenómenos no acaba en interpretar cómo se produce el desplome de estas colosales estrellas. En las tomas de campo profundo del Telescopio Espacial Hubble se busca con tenacidad la presencia de brillantes puntos luminosos, evidencia de la explosión de lejanísimas supernovas. La finalidad de esta búsqueda va mucho más allá de conocer más sobre la muerte de estrellas masivas ya que estos procesos tan luminosos pueden verse a miles de millones de años luz. De hecho, las supernovas al ser uno de los fenómenos más luminosos

que tienen lugar en el Universo, constituyen los candidatos ideales para medir grandes distancias. Son utilizados como indicadores terciarios, es decir, válidos (con un margen de error conocido) para la medida de grandes distancias cósmicas. Las supernovas detectadas hasta el momento por el Hubble son precisamente de Tipo Ia para las cuales existe una relación bien establecida entre su brillo intrínseco y la progresiva caída de luminosidad que sigue a su explosión.

Las estrellas masivas, con una masa superior a unas cuatro veces la solar, en sus últimos estadios evolutivos establecen una titánica lucha contra la fuerza de la gravedad que las aprisiona. La energía de las reacciones nucleares que mantiene la presión del gas estelar debe equipararse en todo momento a la presión que la gravedad ejerce sobre la estrella. En esos estadios las estrellas masivas tienen una estructura en capas que les confiere cierta similitud a una cebolla⁽²⁾. En las capas externas se sintetizan los elementos más ligeros, mientras que en las profundas lo hacen los elementos químicos pesados, aquellos que necesitan enormes temperaturas para generarse de manera eficiente. En el centro de tales estrellas durante los últimos momentos de su vida se calcula que pueden alcanzarse temperaturas de miles de millones de Kelvin, teniendo lugar la formación de un elemento químico que nos resulta conocido por su importancia bioquímica y abundancia en nuestro planeta: el hierro. Al aparecer este elemento ocurren procesos de fotodesintegración en reacciones que absorben gran cantidad de calor e inducen el colapso violento de las regiones centrales de la estrella. En ese momento, el colosal pulso entre la energía interna de la estrella y la gravedad se rompe a favor de esta última, derrumbándose la estrella sobre sí misma. En esos instantes las enormes temperaturas alcanzadas en el núcleo estelar permiten la nucleosíntesis explosiva que produce elementos con números atómicos grandes (con número másico mayor que 64).⁽³⁾ Estos elementos pesados solo se pueden formar en ese momento pues necesitan temperaturas inmensas, capaces de romper las barreras coulombianas de los núcleos progenitores.

En esos instantes las capas superiores se precipitarán a regiones internas, alcanzando una mayor temperatura de manera que se suceden rápidamente gran cantidad de procesos termonucleares, generando gran cantidad de energía. De este modo en pocos segundos a la implosión del núcleo le sigue una explosión de las capas exteriores formadas por la materia que no ha acabado su evolución nucleosintética. De hecho, las capas exteriores al derrumbarse caen sobre el núcleo y cuando éste no puede comprimirse más, rebotan sobre él. En consecuencia se produce una violenta onda de choque que barre hacia fuera las capas externas de la estrella a velocidades superiores a 10.000 km/segundo. La enorme presión a la que es sometido el núcleo

(1) Kippenhahn R.; «Cien mil millones de soles», Biblioteca Científica, Ed. Salvat, Barcelona, 1988.

(2) Audouze J. & Sylvie Vauclair; «An introduction to nuclear astrophysics», D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holanda.

(3) Kippenhahn R., A. Weigert; «Stellar Structure and evolution», Springer-Verlag, Berlín 1990.

de la estrella en esta fase hace que éste sea neutro-nizado, es decir, que cada átomo sea comprimido hasta tal extremo que los protones del núcleo capturen los electrones y el conjunto adquiera carga neutra. A esta estrella se la denomina estrella de neutrones que, sometida a intensos campos magnéticos, puede detectarse en forma de púlsar.⁽⁴⁾ Explosiones de tipo supernova se piensa que también pueden acontecer en estrellas con masa entre 4 y 8 masas solares aunque el resultado sería muy diferente. Tales estrellas acaban su evolución en el estadio de combustión del carbono. La densidad central es tan alta que el gas de electrones que lo forma está degenerado con la fatal consecuencia que las reacciones nucleares que se producen son explosivas. Esto se puede explicar porque en un gas normal la presión actúa como si fuese un termostato de manera que si se produce un incremento de temperatura el gas tenderá a dilatarse equilibrando la temperatura. Por el contrario en el gas degenerado un aumento en la temperatura producirá reacciones nucleares desbocadas que serán la causa del estallido explosivo del carbono. En este caso como el núcleo entero sufre los efectos, la estrella se desintegrará sin que exista ningún remanente, solo una nebulosa dispersándose a gran velocidad. Los estudios espectrales que se han hecho de este tipo de supernovas evidencian ciertos resultados inesperados, como es el caso de la ausencia de líneas de Fe que predicen los modelos teóricos. Ello evidencia en parte que es necesario profundizar en los fenómenos que involucran tales procesos.

Un púlsar es el núcleo estelar superviviente de la explosión supernova

derá a dilatarse equilibrando la temperatura. Por el contrario en el gas degenerado un aumento en la temperatura producirá reacciones nucleares desbocadas que serán la causa del estallido explosivo del carbono. En este caso como el núcleo entero sufre los efectos, la estrella se desintegrará sin que exista ningún remanente, solo una nebulosa dispersándose a gran velocidad. Los estudios espectrales que se han hecho de este tipo de supernovas evidencian ciertos resultados inesperados, como es el caso de la ausencia de líneas de Fe que predicen los modelos teóricos. Ello evidencia en parte que es necesario profundizar en los fenómenos que involucran tales procesos.

La clasificación de las supernovas clásicamente consistió en el estudio del espectro en el momento de máxima luminosidad y en el análisis detallado de la evolución luminosa posterior de la supernova. En el espectro salen a relucir los elementos químicos que constituyen mayoritariamente el plasma en expansión emitido desde la estrella tras la explosión que corresponde generalmente a las capas

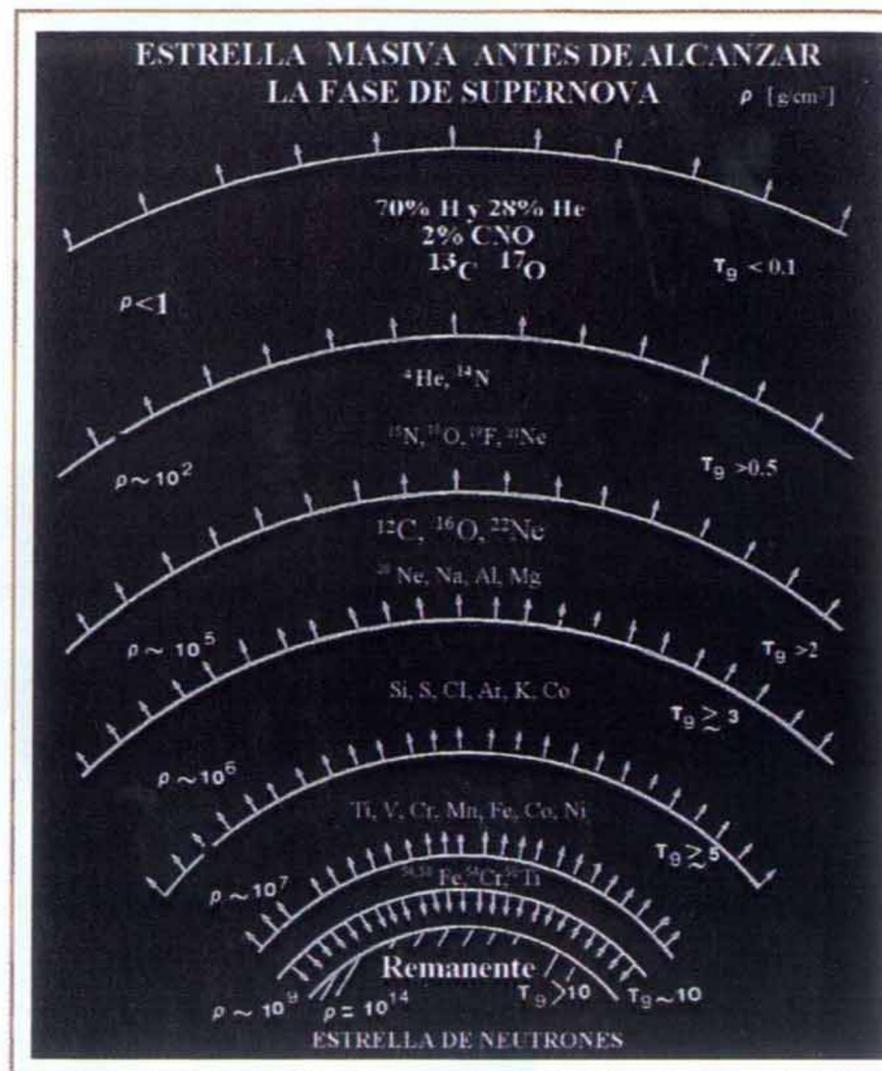
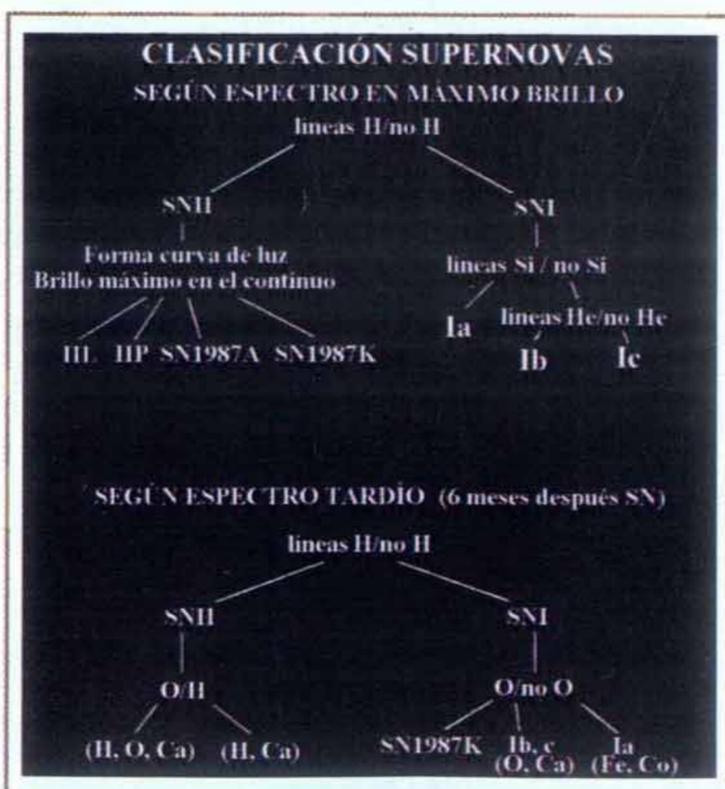


Figura 3. Modelo en capas para una estrella de masa superior a diez masas solares antes de tener lugar la explosión supernova. Nótese que para cada capa se da la densidad aproximada en g/cm³ y la temperatura en T9 que corresponde a unidades de mil millones de Kelvin. (Adaptado de Audouze & Vauclair, 1980).

externas. Ese gas ionizado quedará finalmente como remanente de la muerte estelar, enfriándose paulatinamente al esparcirse por el espacio interestelar y formando curiosas nebulosas. Hace unos años A. Petschek recogió en un libro⁽⁵⁾ los grandes avances en el estudio de los espectros de las últimas fases de supernovas, en base a los cuales consideró dos clases de supernovas: tipos I y II, perfilado mucho más las subclases existentes.

Las supernovas de tipo I poseen curvas de luminosidad que decrecen exponencialmente de manera muy regular y previsible. Los espectros obtenidos de la desintegración de tales estrellas no se observan líneas de hidrógeno y, por el contrario, la materia que se expande aparece claramente enriquecida en elementos pesados. Este tipo de supernovas se observa mayoritariamente en regiones estelares galácticas muy evolucionadas tales como el halo de galaxias espirales, o bien en las galaxias de tipo elíptico. Todo esto indica que en estas explosiones vislumbramos la muerte y desintegración de estrellas maduras que han llegado al límite de su evolución química. Entre las supernovas de tipo I existe una subclasificación que da cuenta, en general, de la presencia o ausencia de determinados elementos durante la fase nebulosa, varios meses tras la explosión. Por ejemplo, en esta fase las supernovas de tipo Ia muestran fuertes líneas de emisión de Fe

Figura 4. Esquema de clasificación de las supernovas. Adaptado de (Petschek, 1990).



y Co, con líneas de absorción de Ca. Sin embargo, las de tipo Ib muestran fuertes líneas de O, Ca y Mg. Otro tipo denominado Ic presenta diferencias más sutiles en la fase nebular.

Por otra parte, las supernovas de tipo II se asocian a estrellas relativamente jóvenes pues suelen observarse en los brazos de galaxias espirales donde la formación estelar está favorecida por enormes nubes de gas y polvo en continuo movimiento alrededor del centro galáctico. Algunas propiedades que las hacen distinguibles son que la luminosidad disminuye de manera más irregular, además que la materia expulsada contiene mayoritariamente H, He, Ca u O. Según pasa el tiempo el gas se enfría y cambia el espectro de la nebulosa remanente. Por ejemplo en la nebulosa del Cangrejo, restos de una estrella desintegrada hace más de novecientos años, sólo se detectan cantidades significativas de H y He.

El 24 de febrero de 1987 Ian Shelton, astrónomo de la Universidad de Toronto tomó una foto rutinaria en la Gran Nube de Magallanes con uno de los telescopios del Observatorio de Las Campanas (Chile). Al analizarla se dio cuenta que aparecía una estre-

lla nueva que con la quinta magnitud era perceptible a simple vista. Precisamente al buscar indicios en fotos anteriores comprobó que el día anterior era apenas perceptible, como una débil estrella cuyo espectro correspondía a una supergigante de clase espectral B3 de unas 20 masas solares. Esto fue una gran sorpresa ya que era lógico que estrellas altamente evolucionadas como las de tipo Wolf-Rayet o las supergigantes de clase espectral M explotasen, pero parecía inusual que lo hiciera una como la observada. Pese a la búsqueda en el campo cercano de otras posibles progenitoras finalmente se concluyó que la SN 1987A fue una estrella que acabó su vida como supernova de Tipo II pese que la teoría no lo hubiera asegurado. Quizás tal explosión fuese incitada por una importante anomalía observada en la composición química de las estrellas de las Nubes de Magallanes: un bajo contenido en metales. Esto podría explicar también la relativa baja luminosidad de la supernova comparada a otras de la misma clase.

La supernova 1987A por otra parte supuso un importante test para los detectores de neutrinos situados en diversas partes del Mundo. En el proceso de explosión de una supernova se esperaba la producción masiva de gran cantidad de neutrinos como resultado de las intensas reacciones term nucleares que ocurren durante el colapso. El neutrino es una partícula elemental, un leptón de masa en reposo prácticamente nula con unas propiedades que le han permitido eludir nuestra observación directa hasta 1956. De hecho, cuando se generan en el interior de la supernova son capaces de atravesar las capas de la estrella sin interactuar con la materia pese a las enormes presiones a las que se generan. Tal producción desbordada de neu-



Figura 5. Imagen de gran campo de la SN 1987A obtenida por el Telescopio Espacial Hubble donde se evidencia en una década la expansión de las capas estelares que forman una brillante nebulosa alrededor de la estrella. (HST/NASA).

trinos supone uno de los más importantes procesos de emisión de energía en la supernova. De hecho, la explosión en el visible o en otras longitudes de onda que se detecta con telescopios constituye tan sólo una pequeñísima parte de toda la energía generada pues otra buena parte abandonará la estrella de forma imperceptible: en forma de neutrinos. Tal y como predecían los modelos, los detectores de neutrinos observaron un fuerte incremento en la cantidad de neutrinos llegada a la Tierra: en total 19 neutrinos casi consecutivos a las 7h 36m del 23 de febrero, las primeras evidencias de que una explosión de supernova había tenido lugar. Algunas horas más tarde los astrónomos pudieron descubrir en el rango visible el impresionante estallido luminoso de esta supernova.

La SN 1987A ha enseñado mucho a la comunidad astrofísica no sólo por su relativa proximidad sino también por su aparentemente inesperado estallido siendo una estrella supergigante de clase B. Este tipo de casos inusuales nos enseña la necesidad de revisar y mejorar nuestras teorías para que permitan comprender cada uno de los casos que se presentan, incluso en el caso de estrellas de composición anómala.⁽⁷⁾

J.M.T. ■

La supernova 1987A explotó de manera inesperada. Su escasez en metales cambió su destino

* El autor agradece al doctor Joan Antoni Miralles (Universidad de Alicante) sus sugerencias.

(4) Shapiro S.L., S.A. Teukolsky, «Black holes, white dwarfs and neutron stars», Wiley Publ, 1997.

(5) Petschek A.G. ed.; «Supernovae», Springer-Verlag, Nueva York 1990.

(6) Marcaide J.M. et al., «Expansion of SN 1993J», Science vol.270, 1 dec. 1995, p. 1475-1478.

(7) Burrows, A. «Supernova Explosions in the Universe», Nature, 403, 727-735, 2000.