

SUPERNOVAS: el fin catastrófico de una vida estelar

Elsa Giacani y Gloria Dubner

Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA

Una supernova es una violenta explosión que marca el fin de la vida de una estrella. El material que la compone sale expulsado al espacio a velocidades de decenas de millones de kilómetros por hora y enriquece el gas interestelar con los átomos que fabricó la estrella durante toda su existencia. La explosión brilla como cientos de miles de estrellas reunidas en un punto y es uno de los hechos más espectaculares del universo. Sus vestigios, llamados restos de supernovas, forman hermosas nebulosas en cuyo interior se pueden encontrar estrellas de neutrones y hasta agujeros negros.

Remanente de supernova Cygnus Loop,
Foto J.J. Hester / Arizona State University y NASA
Co-investigadores PA Scowen (Arizona State University),
Ed Groth (Princeton University), Tod Lauer (NOAO) y el
Equipo de Definición de Instrumento WFPC.

En una despejada noche de primavera de 1006, los astrólogos imperiales de la dinastía china Song registraron la aparición de una estrella nueva, visible hacia el sudeste, y describieron que su forma era como la de una media luna con rayos, y era tan brillante que uno podía realmente ver las cosas con su luz. Otros observadores de los fenómenos celestes, en Japón, Corea, Egipto e incluso en un convento en los Alpes suizos, notaron también la maravillosa aparición de esa estrella, tan brillante que era visible de día, aun con el Sol cerca. La explosión que dio origen al fenómeno ocurrió a 7000 años luz de la Tierra, en la constelación Lupus, y fue el acontecimiento celeste más luminoso registrado en la historia de la humanidad. La nebulosa formada por esa explosión se expandió hasta alcanzar un diámetro de 60 años luz y continúa expandiéndose a una velocidad cercana a los nueve millones de kilómetros por hora. El astrónomo aficionado y astrofotógrafo turco Tunç Tezel recreó la sorprendente imagen vista en el cielo ese día y varios siguientes (figura 1).

Alrededor de 1514, Nicolás Copérnico expresaba el pensamiento aristotélico imperante por siglos de que el universo, más allá de la Luna y los planetas, no cambia ni se mueve con estas palabras: *Primero de todo y en todos lados está la esfera de estrellas fijas, la cual se contiene a sí misma y a todo, y por esta razón es inmutable.* Pero en 1572 el descubrimiento por el astrónomo danés Tycho Brahe de una super estrella nueva en la constelación de Casiopea, que en sus palabras brillaba con la intensidad de Júpiter, puso definitivamente en tela de juicio la estabilidad e inmutabilidad del universo. En la actualidad se sabe que las estrellas cambian con el tiempo. En algunos casos ese cambio es imperceptible para noso-

tros, incluso aún en un tiempo comparable a toda la historia de la humanidad, pero en otros los cambios son más dramáticos y ocurren en escalas de tiempo humanas.

Nacimiento, vida y muerte de las estrellas

Las estrellas se forman a partir de grandes nubes densas y muy frías de gas, tan frías que su temperatura ronda los 10°K, es decir, 263°C bajo cero. Con el tiempo y por alguna causa, por ejemplo la explosión de una estrella vecina, las nubes comienzan a aglutinarse, por acción de la fuerza de gravedad, y forman grumos más densos de material. El aumento de densidad de esos grumos con respecto a su entorno crea un mayor campo gravitatorio, que va atrapando más y más materia y, con ello, aumentando la temperatura en su centro. Esas densas concentraciones gaseosas se denominan *protoestrellas*. Al cabo de cierto tiempo, que puede variar entre 10 mil y 10 millones de años según la masa de cada protoestrella, estas alcanzan en su centro temperaturas suficientes como para que se inicien reacciones de fusión atómica, es decir, de unión de núcleos atómicos livianos para formar otros más pesados. La energía resultante de esa fusión crea la presión necesaria para contrarrestar el proceso de contracción por efecto de la gravedad. Ese es el momento preciso del nacimiento de una estrella.

De allí en adelante, esa fusión nuclear, que libera energía, mantiene brillando a las estrellas durante toda su vida.

Figura 1. Reconstrucción actual por el astrónomo aficionado y fotógrafo turco Tunç Tezel de la apariencia de una supernova acaecida en 1006, cuya nebulosa se conoce hoy como SN1006. La imagen tiene por base una fotografía del cielo nocturno tomada en 1998 en la costa del Mediterráneo poco al sur de Antalya (Turquía). El brillo de la supernova, que fue incluida digitalmente en la imagen en la posición en que se la hubiese visto hace más de un milenio, fue calculado sobre la base de registros chinos. Ilustración publicada por cortesía del nombrado.



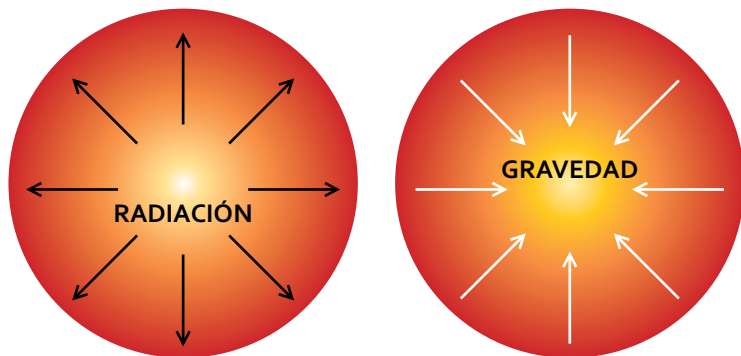


Figura 2. Esquema de las dos fuerzas que definen la evolución de las estrellas: la fuerza centrípeta originada en la gravedad de la propia masa estelar y la fuerza centrífuga creada por las reacciones de fusión nuclear que ocurren en el centro de las estrellas.

Por ejemplo, en el Sol se fusionan más de 700 millones de toneladas de hidrógeno cada segundo y se convierten en helio; por cada kilo de hidrógeno que se fusiona, siete gramos se convierten en energía pura irradiada. Esa energía irradiada por el Sol en un segundo equivale a la explosión de diez mil millones de grandes bombas de hidrógeno, algo que viene ocurriendo en forma continua desde hace unos 4500 millones de años.

Simplificando, una estrella es una esfera de gas sometida a la fuerza de gravedad que produce su propia materia, una fuerza que tiende a atraer el gas radialmente hacia el centro y a comprimirlo. Durante la mayor parte de su vida, sin embargo, la estrella se mantiene en equilibrio por la acción de otra fuerza radial de intensidad

PROCESO DE FUSIÓN DE	TEMPERATURA (K)	DURACIÓN
Hidrógeno (H)	40.000.000	nueve millones de años
Helio (He)	170.000.000	un millón de años
Carbono (C)	700.000.000	mil años
Oxígeno (O)	2.100.000.000	unos diez años
Silicio (Si)	3.500.000.000	unos días

Tabla 1. Fases de fusión atómica de una estrella aproximadamente 25 veces mayor que el Sol.

ESTRELLAS DE NEUTRONES: UNA FAMILIA CADA VEZ MÁS AMPLIA

Las estrellas de neutrones solo se originan cuando una estrella muere como consecuencia de colapso gravitacional. Tienen entre una y dos masas solares, contenidas en una esfera de 10km de radio, lo que implica que su densidad alcanza a unos 10^{14}gr/cm^3 (o cien millones de toneladas por cm^3) equivalente a la densidad que resultaría de compactar el Aconcagua al tamaño de una cucharita de té.

Las estrellas de neutrones se cuentan entre los objetos más densos del universo, con una aceleración gravitacional en su superficie 190 mil millones de veces más intensa que la de la Tierra. Su gravedad es tan intensa que si una nave aterrizara en su superficie se aplastaría instantáneamente y quedaría hecha una lámina de 0,0000001mm de espesor. Por efectos de una fuerza de gravedad de esa magnitud, los átomos pierden el espacio vacío entre el núcleo y la nube de electrones que lo rodea. Cabe recordar que el núcleo atómico contiene más del 99,9% de la masa, pero su diámetro es menos de una cienmilésima parte del diámetro del átomo, que está definido por la posición de la nube de electrones. De modo que un átomo de cualquier material, aunque parezca muy sólido, consiste de un 99,99% de espacio vacío.

Las estrellas de neutrones rotan a enorme velocidad y tienen un intensísimo campo magnético. Lo primero se debe a que el momento angular de la estrella se conserva a medida que ella se contrae, por lo que se incrementa su velocidad de rotación, lo mismo que un patinador que gire como un trompo y contraiga sus brazos sobre su cuerpo. Del mismo modo, como la energía del campo magnético no puede desaparecer, al contraerse el núcleo de la estrella también se contrae el campo magnético y aumenta su intensidad.

Como consecuencia, estas estrellas constituyen gigantescos imanes, cuyos campos magnéticos pueden alcanzar valores

de hasta 10 millones de millones (10^{22}) de Gauss, imposibles de imaginar con la experiencia terrestre. A los efectos de comparar, téngase presente que el campo magnético del Sol es de 50 Gauss; el de la Tierra, 0,6 Gauss; el de un imán de heladera, 100 Gauss; el de una resonancia magnética para diagnóstico médico, 10.000 Gauss, y el gran acelerador de partículas construido en Ginebra, llamado gran colisionador de hadrones (*large hadron collider*) operará con campos magnéticos de unos 80.000 Gauss.

Las estrellas de neutrones tienen, por lo menos, dos componentes diferentes: una cáscara cristalina sólida, muy rígida, de aproximadamente un kilómetro de espesor, formada principalmente por núcleos de hierro; y un interior cuyo estado llamamos *líquido neutrónico*, pero cuyas propiedades aún desconocemos. Creemos que las altísimas densidades encontradas en ese interior forman núcleos atómicos con gran abundancia de neutrones, incluyendo especies desconocidas en el laboratorio, como el kriptón 118. Se estima que entre la cáscara exterior y el centro, la densidad varía mil millones de veces. Se ha llegado a estas conclusiones sobre la base de las teorías actuales de física de partículas y del análisis de las características de los pulsos de radiación emitidos por esas estrellas.

Otra peculiaridad es que, por lo general, el eje magnético de las estrellas de neutrones no está alineado con su eje de rotación, al igual que sucede en la Tierra. El gran campo magnético en rotación crea un intenso campo eléctrico, el cual hace que los electrones de la superficie escapen de la estrella a velocidades cercanas a la de la luz y según la dirección de las líneas del campo magnético. Se produce así una intensa radiación electromagnética, llamada *radiación de sincrotrón*, que se expande en forma de cono desde los polos norte y sur magnéticos de la estrella.

parecida, que actúa en sentido contrario: la fuerza creada por las reacciones de fusión nuclear que están ocurriendo en el interior de su masa, que empuja el gas hacia afuera (figura 2). La vida estelar (o evolución estelar) es una batalla continua entre esas dos fuerzas y da lugar a sucesivos procesos termonucleares, ya que al agotarse el combustible nuclear la estrella comienza a colapsar por acción de su gravedad, pero ese mismo colapso hace que la temperatura central aumente y se inicie un nuevo ciclo de fusión que asegura la supervivencia del astro.

Pero el proceso no se repite en forma idéntica, porque cada etapa sucesiva de fusión se inicia con átomos más pesados y requiere, en consecuencia, de temperaturas cada vez más altas para ponerse en marcha. El combustible nuclear, por eso, se agota cada vez más rápido (tabla 1). Cuánto tiempo dura cada fase sucesiva y qué elementos atómicos puede sintetizar la estrella en esas fases dependen casi exclusivamente de su masa. En líneas generales, las estrellas de masa reducida pueden ser tan antiguas como el universo mismo, mientras que las que tienen una masa varias veces superior a la

del Sol agotan su combustible nuclear en unos pocos cientos de miles de años.

Para estrellas que tienen un tamaño comparable con el del Sol, que son la mayoría, las reacciones de fusión nuclear comienzan con el hidrógeno, que se transforma en helio. Luego el helio se convierte en carbono y este, después, en oxígeno. Al llegar a este punto, el combustible se acaba y la estrella tiene una muerte relajada: pasa primero por una fase de *gigante roja* y después se convierte en una *enana blanca*, con un núcleo de carbono y oxígeno que se apaga lentamente por un proceso de enfriamiento por radiación térmica. Las enanas blancas tienen temperaturas de alrededor de un millón de grados y una masa típica, comprimida en un tamaño similar al de la Tierra, menor o igual a 1,4 masas solares. No pueden exceder el último valor, conocido como el *límite de Chandrasekhar*.

Las estrellas muy masivas, es decir, con una masa por lo menos ocho veces la del Sol, concluyen su vida en forma más drástica. Tienen suficiente combustible como para que las reacciones de fusión nuclear puedan continuar más allá del oxígeno y formar átomos de neón,

Si el cono de la radiación de sincrotrón apunta hacia la Tierra, al rotar la estrella lo vemos pasar como la luz de un faro, es decir como pulsos de una frecuencia igual a la velocidad de rotación del astro, motivo por el cual estas estrellas fueron denominadas *pulsares* o *estrellas pulsantes*. Los períodos de un pulsar son muy regulares, con la precisión de relojes atómicos. Por esta razón cuando el radioastrónomo británico Anthony Hewish (nacido en 1924) y su entonces estudiante de doctorado Jocelyn Bell (nacida en 1943) detectaron el primer pulsar en 1967, pensaron que podría tratarse de seres inteligentes que enviaban mensajes cósmicos. Poco después identificaron otras fuentes de la misma naturaleza y pudieron interpretar esas señales sin apelar a la hipótesis de vida extraterrestre. Siete años más tarde, en 1974, Hewish recibió el premio Nobel de física, compartido con su colega Martin Ryle (1918-1984), por su decisiva participación en ese descubrimiento. Fueron los primeros astrónomos en recibir ese premio.

Hoy se han identificado más de 1600 pulsares en nuestra galaxia, algunos con períodos de apenas unas milésimas de segundo; y por cada estrella de neutrones que conocemos debe haber unas 100.000 que aún no hemos detectado. El pulsar más rápido identificado a la fecha da una vuelta cada 0,00156 segundos (unas 38.500 revoluciones por minuto). Aproximadamente el 7% de los pulsares son miembros de sistemas binarios, con compañeras que pueden ser enanas blancas u otras estrellas de neutrones.

El estudio de los pulsares ha servido para establecer por primera vez la existencia de planetas extrasolares (véase 'Planetas extrasolares y la búsqueda de otras tierras' en este mismo número de CIENCIA HOY). Sirven también como relojes cosmológicos, que por su estabilidad en el largo plazo compiten con los relojes atómicos de cesio. Por otro lado, los pulsares proporcionan la

oportunidad de comprobar determinadas predicciones de la teoría general de la relatividad.

Cuando se creía comprender bien la física de los pulsares, nuevos instrumentos de observación que operan en la frecuencia de los rayos X permitieron descubrir en las últimas décadas una nueva clase de estrellas de neutrones, cuya naturaleza es aun más sorprendente que la de las primeras conocidas. Entre ellas están los denominados *magnetares* o *estrellas magnéticas*, los objetos más magnetizados del universo, con campos magnéticos de hasta de 10^{16} Gauss, que obtienen su potencia precisamente del decaimiento del campo magnético.

Entre estos nuevos pulsares exóticos están los *pulsares anómalos en rayos X*, que son extremadamente brillantes en rayos X, pero con una luminosidad que decae a lo largo del espectro electromagnético. Emiten débil luz visible, radiación infrarroja más débil aún y no emiten ondas de radio. Se conocen muy pocos de estos objetos, no muchos más de una docena. Son relativamente jóvenes y todos rotan con lentitud, con períodos de rotación de entre seis y doce segundos (entre cinco y diez revoluciones por minuto). No está claro aún si ese rango de períodos de rotación se debe a efectos de la forma de observación (o efectos de selección) o si es producido por condiciones físicas peculiares. Sea como fuere, se trata de una conclusión estadísticamente débil, por basarse en la observación de pocos casos.

También dentro de la categoría de estrellas magnéticas están los llamados *repetidores en rayos gamma suaves*, descubiertos en 1987. Emiten en forma permanente radiación X pulsante y, esporádicamente, tienen estallidos de radiación gamma suave en los que irradian en un segundo tanta energía como el Sol emite en un año. Esos estallidos pueden durar entre un par de segundos y varios minutos, un abrir y cerrar de ojos en las escalas del tiempo cosmológico.

magnesio, silicio, azufre, argón, calcio, titanio y hierro. Terminan con una estructura de capas concéntricas formadas por los diferentes elementos, semejantes a las de una cebolla. Los elementos más livianos ocupan las capas externas; los más pesados, las internas, en las que las temperaturas son superiores. En cada una de las sucesivas etapas de fusión se libera una cantidad de energía cada vez menor. Cuando la estrella llega finalmente a un núcleo formado casi exclusivamente por átomos de hierro, la catástrofe se aproxima: una supernova está por producirse.

Una muerte violenta: la explosión de una supernova

Cuando una estrella comienza con la formación de núcleos atómicos más pesados que el hierro, se produce una dramática y veloz secuencia de acciones en su interior. La fusión de átomos de hierro no solo no libera energía al exterior, lo que permitiría contrarrestar la gravedad, sino que consume energía del resto de la estrella. En tales circunstancias, el núcleo estelar se contrae enormemente y su densidad aumenta tanto que se produce una implosión gravitacional: los electrones que forman el gas de la estrella resultan empujados hacia los núcleos de los átomos, donde reaccionan con los protones y forman neutrones.

Cuando el núcleo llega a tener una masa entre 1,4 y 3 veces la masa del Sol, en apenas una décima de segundo el núcleo estelar colapsa y forma un nuevo objeto tremendamente compacto: una *estrella de neutrones*, de características similares a lo que se obtendría si se compactase el Sol hasta que formara una bola de 10km de radio. Las capas externas de la estrella, al no encontrar resistencia, caen sobre ese núcleo compactado o estrella neutrónica, rebotan y salen despedidas al espacio, donde se dispersan, a velocidades de entre 20 y 40 millones de kilómetros por hora.

Ese proceso explosivo se llama explosión de supernova y constituye uno de los fenómenos más espectaculares del universo. En pocos segundos se acaba una vida estelar de cientos de miles de años y se libera al espacio una energía de unos 10^{53} ergios (equivalente a la irradiada por el Sol durante 820.000 millones de años). El 99% de esa energía se canaliza a la creación de neutrinos (partículas subatómicas sin carga y prácticamente sin masa, que escapan sin interactuar con la materia). El 1% restante es energía cinética inyectada al espacio, una cantidad equivalente a la producida durante la explosión simultánea de 10^{28} bombas atómicas de 10 megatonnes cada una.

Durante los días siguientes a la explosión, el brillo de la supernova puede ser mayor que el de toda la galaxia que la aloja; luego se va apagando gradualmente, en un lapso de días o meses. Con la explosión se liberan al

espacio todos los elementos químicos producidos en el interior estelar durante toda la vida de la estrella, los que enriquecen químicamente el entorno. De esta manera, las supernovas se convierten en uno de los motores principales de la evolución química de las galaxias.

Para comprender la importancia de las supernovas basta decir, por ejemplo, que el carbono presente en las estructuras biológicas de nuestro planeta, el hierro de nuestra sangre, el calcio de nuestros huesos o el oxígeno que respiramos se formaron en estrellas que explotaron en la vecindad solar hace más de cinco mil millones de años. El Sol, estrella de segunda o tercera generación, se formó a partir de gas enriquecido con elementos más pesados que el hidrógeno y helio primordiales. Con los restos de la nube protosolar se formaron los planetas y por lo menos en uno de ellos hoy hay vida constituida por una combinación de los elementos sintetizados en el seno de las estrellas y liberados por una supernova.

En el caso extremo de que la masa del núcleo de la estrella sea mayor que tres masas solares, la energía no alcanza para expeler las capas externas de la estrella. Toda su masa cae sobre el núcleo y nada puede detener el colapso. Se forman entonces los *agujeros negros*, objetos tan compactos y con una atracción gravitatoria tan intensa que nada puede escapar de ellos, ni siquiera la luz, de modo que solo se los advierte por los efectos que causan a su alrededor.

La muerte estelar por el colapso gravitacional de estrellas de alta masa se clasifica en supernovas tipo Ib, Ic y II, según la forma en que decae su luz durante aproximadamente un año después de ocurrida la explosión, así como según el espectro de esa luz. Como en esa notación falta el tipo Ia, no se equivocará el lector que concluya que existe alguna otra forma en que las estrellas acaban de manera violenta.

Sucede que las de baja masa también pueden tener un final catastrófico. Dos escenarios distintos han sido propuestos para explicar cómo una enana blanca se puede transformar en supernova. Cuando tal estrella forma parte de un sistema binario (dos estrellas que orbitan alrededor de un centro común) puede ocurrir que su compañera evolucione en forma más lenta y cuando atraviesa la fase de gigante roja se infla, invadiendo el espacio de la enana blanca vecina. De esta forma le arroja materia y puede aumentarle la masa hasta que alcance el límite crítico, 1,4 masas solares o límite de Chandrasekhar. La enana blanca sufre entonces una reacción nuclear explosiva que en segundos la destruye totalmente sin dejar ningún remanente estelar compacto. La otra posibilidad es que ambas estrellas del sistema binario envejezcan parejas hacia el estadio de enana blanca y queden inmersas en una envoltura gaseosa común, alcanzando así entre ambas el valor crítico de masa necesario para desencadenar el estallido termonuclear del sistema completo. Este tipo de supernovas se denomina supernovas de tipo Ia

SUPERNOVAS HISTÓRICAS

En el universo visible explotan unas ocho supernovas por segundo, es decir, casi 30.000 por hora. En la Vía Láctea se estima que explotan unas dos por siglo. Se han encontrado registros de espectaculares explosiones por parte de astrónomos o astrólogos de China, Japón, Corea, países árabes y hasta en petroglifos de culturas indígenas americanas. Hay evidencias de explosiones ocurridas en los años de nuestra era 386, 1006 (mencionada al comienzo del artículo), 1054 (a la que se refiere la figura de este recuadro), 1181, 1572 (la *super estrella nueva* descubierta por Tycho Brahe en la constelación Casiopea) y 1604 (descubierta por Johannes Kepler). Estudios actuales en la región de la constelación Casiopea indican que otra explosión tuvo lugar allí en 1658; debe haber ocurrido en una región oscurecida por nubes de polvo interestelar, ya que pasó inadvertida para los habitantes de la Tierra, aun cuando en ese momento ya se había inventado el telescopio.

Desde entonces, no se han visto más explosiones en nuestra galaxia, pero los astrónomos fueron testigos recientes de una estrella que explotó en la Gran Nube de Magallanes, una galaxia vecina ubicada a 168.000 años luz de nosotros. La supernova se llama SN1987A, siguiendo una convención astronómica que designa el objeto, el año en que ocurre y el orden de su descubrimiento. La luz de semejante explosión llegó a la Tierra el 23 de febrero de 1987. Es la supernova más cercana explotada en la era de los telescopios, lo que permitió a los astrónomos analizarla en detalle usando instrumentos modernos (figura 5).

La figura 6 muestra una pictografía rupestre de la cultura Anasazi, encontrada en cañón Chaco, en el estado norteamericano de Nuevo México. Es muy posible que registre la aparición de una supernova, considerada una estrella nueva en el cielo. Los astrónomos piensan que se trata de un fenómeno ocurrido en el año 1054, que se mantuvo visible durante veintidós meses. Esta explosión dio lugar a la formación de la nebulosa del Cangrejo, que tiene un tamaño de unos 12 años luz y se encuentra aproximadamente a 6300 años luz en la constelación de Tauro.



Figura 5. El 23 de febrero de 1987, en un observatorio situado en el norte de Chile se descubrió una supernova (denominada SN1987A) que explotó en la vecina galaxia Nube Grande de Magallanes. La imagen muestra una combinación de las emisiones que se observan hoy, en luz visible y en rayos X, y revela episodios de la vida de la estrella anteriores a la explosión (los anillos rojos creados por el viento estelar) y las consecuencias de ella (el collar de puntos blancos). (Rayos X: NASA/CXC/PSU/S Park y D Burrows.; Óptico: NASA/STScI/CfA/P Challis)

Figura 6. Izquierda: pictografía de la etnia Anasazi que habitó territorios del sudoeste de los Estados Unidos en el siglo XI de nuestra era. Se ha supuesto que registra la aparición de una estrella nueva el 4 de julio de 1054.

Derecha: en falso color, el remanente de la explosión que originó esa estrella, en la nebulosa del Cangrejo, tal como se observa actualmente en diferentes rangos del espectro electromagnético con los telescopios espaciales Chandra, Hubble y Spitzer. (Izquierda: fotografía tomada por una de las autoras; Derecha: Rayos X: Chandra, NASA, J Hester [ASU] y colaboradores; Óptico: ESA, J Hester y A Loll [ASU]; Infrarrojo: JPL-Caltech, R.Gehrz [U. Minn.])

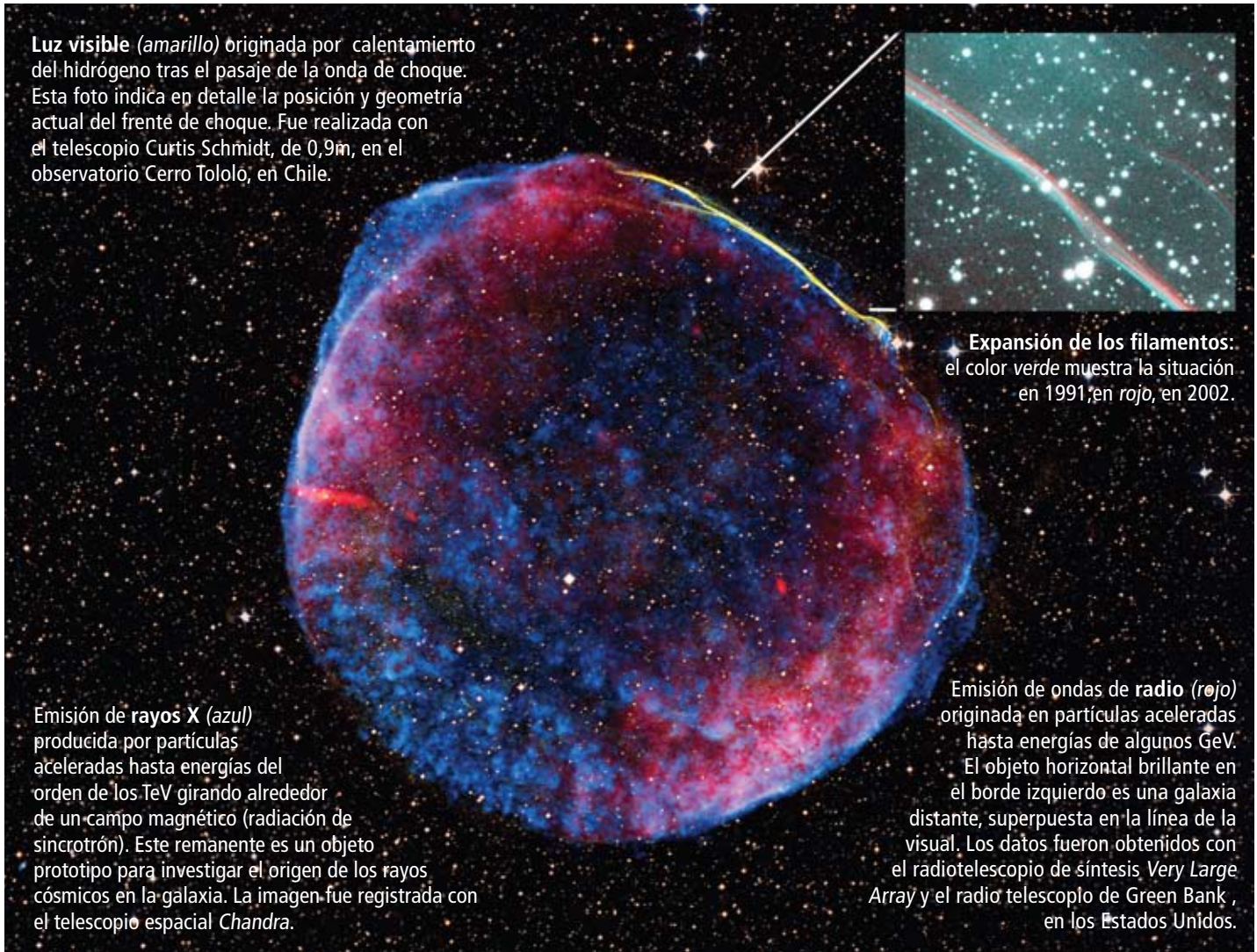
y son más brillantes que las resultantes de un colapso gravitacional. Sus curvas de luz son muy similares entre sí, propiedad que las convierte en excelentes lámparas patrón para medir distancias e investigar modelos cosmológicos de evolución del universo.

Restos de supernovas

Independientemente de la forma en que una estrella haya llegado a su final violento, los acontecimientos que le siguen son en todos los casos similares. Se forman

remanentes de supernovas, estructuras que aparecen en el espacio como consecuencia de la onda de choque supersónica causada por la explosión, que se expande en el medio interestelar y barre el material que encuentra en su camino. La materia estelar expulsada, el gas ambiente barrido y el núcleo compacto que pudo haber quedado forman el remanente de supernova. Así se forman bellísimas nebulosas, que brillan en el cielo por decenas de miles de años, y que al expandirse modifican irreversiblemente el medio circundante.

Los remanentes de supernovas cambian las propiedades físicas de las nubes interestelares y la química del



Luz visible (amarillo) originada por calentamiento del hidrógeno tras el pasaje de la onda de choque. Esta foto indica en detalle la posición y geometría actual del frenté de choque. Fue realizada con el telescopio Curtis Schmidt, de 0,9m, en el observatorio Cerro Tololo, en Chile.

Emisión de rayos X (azul) producida por partículas aceleradas hasta energías del orden de los TeV girando alrededor de un campo magnético (radiación de sincrotrón). Este remanente es un objeto prototipo para investigar el origen de los rayos cósmicos en la galaxia. La imagen fue registrada con el telescopio espacial Chandra.

Expansión de los filamentos: el color verde muestra la situación en 1991; en rojo, en 2002.

Emisión de ondas de radio (rojo) originada en partículas aceleradas hasta energías de algunos GeV. El objeto horizontal brillante en el borde izquierdo es una galaxia distante, superpuesta en la línea de la visual. Los datos fueron obtenidos con el radiotelescopio de síntesis Very Large Array y el radio telescopio de Green Bank, en los Estados Unidos.

Figura 3. La nebulosa SN1006 como se la ve hoy en día con diferentes luces. Imágenes adquiridas con diferentes telescopios ubicados en observatorios terrestres y espaciales. (Rayos X: NASA/CXC/Rutgers/G Cassam-Chenaï, J Hughes y colaboradores; Radio: NRAO/AUI/NSF/GBT/VLA/Dyer, Maddalena y Cornwell; Óptico: Middlebury College/F.Winkler, NOAO/AURA/NSF/CTIO Schmidt y DSS)

medio interestelar, ya que pueden formar y disociar moléculas, así como formar y destruir granos de polvo. Con sus poderosas ondas de choque comprimen y fragmentan nubes moleculares e inducen al colapso gravitacional, con lo que son incluso capaces de iniciar un nuevo ciclo de formación estelar.

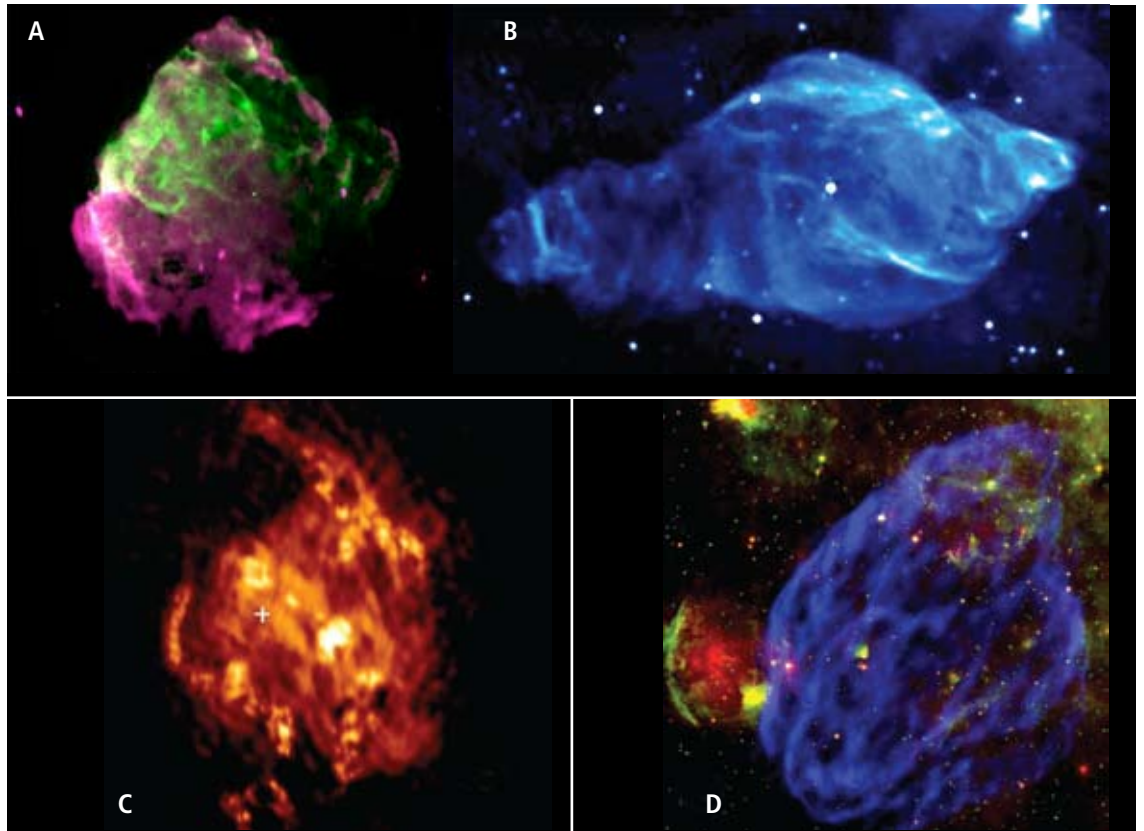
Los restos de supernovas emiten radiación a lo largo de todo el espectro electromagnético, desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. El análisis en los distintos rangos espectrales de esa radiación nos proporciona conocimiento sobre los mecanismos de la explosión, las propiedades de la estrella que explotó y las condiciones del ambiente en el que todo aconteció (figura 3).

Desde hace más de veinte años, en el Instituto de Astronomía y Física del Espacio en Buenos Aires se investigan los restos de explosiones de supernovas y su impacto en nuestra galaxia. La figura 4 muestra, a título de ejemplo, algunas de las imágenes más notables obtenidas por

el equipo de trabajo que integran las autoras, a partir de observaciones realizadas con instrumentos avanzados en observatorios de todo el mundo, más otros obtenidos en observatorios espaciales. Estos estudios han revelado muchas cosas, por ejemplo:

- Las consecuencias del encuentro de las poderosas ondas de choque del resto de supernova Puppis A con nubes de gas externas.
- La acción que ejercen los chorros de partículas emitidos por el posible agujero negro denominado SS433 en el centro del resto de supernova W50.
- La nebulosa creada en el resto de supernova G0.9 + 0.1 por la acción del viento de electrones y positrones originado en la estrella de neutrones central.
- La nebulosa creada por la estrella de neutrones central y una región de nacimiento de estrellas, en las adyacencias del resto de supernova W44. **CH**

Figura 4. (a) Imagen en falso color de la emisión de ondas de radio (púrpura) y de rayos X (verde) del remanente de supernova Puppis A; (b) imagen en radio del resto de supernova W50 con la fuente compacta SS433 en su centro; (c) imagen en ondas de radio de la nebulosa de viento soplada por el pulsar dentro del resto de supernova G0.9+0.1; (d) composición de imagen en ondas de radio (azul) con emisiones en infrarrojo (rojo y verde) del resto de supernova W44. Las cuatro imágenes provienen del grupo de trabajo que integran las autoras.



LAS MISTERIOSAS FUENTES DE RAYOS GAMMA

En los últimos años la astronomía de rayos gamma ha cobrado un notable impulso con el desarrollo de nuevos instrumentos que permitieron mejorar notablemente la ubicación de las fuentes emisoras en el cielo. Telescopios terrestres como Magic, Veritas y Hess fueron diseñados para detectar rayos gamma ultraenergéticos, del orden de los TeV (tera electrón-voltios). Telescopios espaciales, como Agile y Fermi, pueden identificar fuentes de rayos gamma con energías del orden de los MeV y GeV (mega y giga electrón-voltios). Estos instrumentos brindan información con suficiente definición espacial como para permitir conjeturar con alguna precisión sobre el origen de esa radiación.

A pesar de que la naturaleza de muchas de las fuentes de radiación gamma es todavía una incógnita, entre las que han podido atribuirse a un objeto celeste preciso se cuentan numerosas asociadas con restos de supernovas o con las nebulosas de viento causadas por las estrellas de neutrones. Ello sucede de manera cierta o muy probable con un tercio de las emisiones de alta energía y más de un cuarto de las de ultraalta energía.

Por esta razón, el estudio de los restos de supernovas y sus pulsares, así como del gas fuertemente perturbado que los rodea, cobra notable relevancia, ya que pueden ser la llave para comprender los procesos que originan las emisiones de mayor energía en el universo.

LECTURAS SUGERIDAS

- APPELL D**, 2008, 'Saul Perlmutter: fuerzas oscuras', *Investigación y Ciencia*, julio.
- FRYER C** (ed.), 2004, *Stellar Collapse*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- HAMUY M Y MAZA J**, 2008, *Supernovas: el explosivo final de una estrella*, Ediciones B, Santiago de Chile.
- MARSCHALL L**, 1991, *La historia de la supernova*, Editorial Gedisa, Buenos Aires.
- STEPHENSON FR Y GREEN DA**, 2002, *Historical Supernovae and their Remnants*, Clarendon Press, Oxford.
- WHEELER JC**, 2000, *Cosmic catastrophes*, Cambridge University Press, Cambridge.



Elsa Giacani

Doctora en física, Universidad Nacional de La Plata.
Profesora adjunta, Universidad de Buenos Aires.

Investigadora independiente, Conicet.
egiacani@iafe.uba.ar



Gloria Dubner

Doctora en física, Universidad Nacional de La Plata
Investigadora principal, Conicet.

Directora de grupo de investigación sobre Restos de Supernovas, IAFE.
gdubner@iafe.uba.ar