

RESTOS DE EXPLOSIONES DE SUPERNOVA VISTOS A TRAVÉS DEL ESPECTRO

Gloria M. Dubner

Instituto de Astronomía y Física del Espacio (CONICET-Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad de Buenos Aires); CC 67 - Suc. 28
C1428ZAA-Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
Email: gdubner@iafe.uba.ar

Resumen

Las Supernovas (SN) son uno de los eventos más espectaculares y energéticos del Universo. Los Remanentes de Supernova (RSN) son las estructuras que resultan de dichas explosiones estelares. Su evolución modifica en forma irreversible las propiedades físicas y químicas de su entorno, convirtiéndose así en un laboratorio único para investigar condiciones extremas, imposibles de alcanzar en laboratorios terrestres. Pueden radiar por miles de años y a través de todo el espectro electromagnético, pero las características de dicha radiación varían de una banda espectral a otra. Este trabajo presenta una breve síntesis de la información que aportan los telescopios operando en diferentes rangos espectrales, desde ondas de radio hasta los rayos gamma de muy alta energía.

Palabras clave: Remanentes de Supernova; radiación de sincrotrón; emisión en radio; infrarrojo; óptico; rayos X; rayos gamma.

Abstract

Supernova Remnants seen through the spectrum. Supernovae (SN) are one of the most spectacular and energetic events in the Universe. Supernova Remnants (SNR) are the structures created after such stellar explosions. Their evolution irreversibly modifies the physical and chemical properties of the surroundings, thus becoming a laboratory unique to investigate extreme conditions, impossible to be attained in terrestrial laboratories. The SNRs can radiate during thousands of years and throughout the whole electromagnetic spectrum, but the characteristics of the radiation vary from one spectral band to the other. This article presents a brief synthesis of the information provided by telescopes operating in different spectral ranges, from radio waves to the very energetic gamma rays.

Key words: Supernova remnants; synchrotron radiation; radio emission; infrared; optical; X-rays; gamma-rays.

1. Introducción

Si trazamos una línea temporal podemos ubicar el nacimiento de la materia, la energía, el tiempo y el espacio, es decir origen del Universo, hace unos 13800 millones de años. Alrededor de 4500 millones de años atrás, la formación del planeta Tierra y sólo unos 700 millones de años más tarde (hace unos 3800 millones de años), podemos señalar el inicio de la formación de estructuras moleculares grandes y complejas con determinadas propiedades que luego permitieron la aparición de organismos vivos, originando la biología terrestre. Esa evolución tan rápida (en tiempos astronómicos) desde la formación del planeta hasta la aparición de vida, tuvo entre otras causas el hecho que el planeta contaba ya en su inventario con una buena dotación de átomos más pesados que el H fabricado al inicio del Universo, es decir átomos procesados en el seno de las estrellas y luego liberados al espacio. El nexo imprescindible entre el H primordial y la formación de organismos primitivos, es necesariamente una explosión de supernova (SN) que debe haber ocurrido en el pasado en la vecindad solar, enriqueciendo el gas interestelar (con el que más tarde se formarían el Sol y sus planetas) con átomos como el C, O, N, Ca, Fe, etc., que se formaron por fusión termonuclear en el interior de estrellas. De no mediar una violenta explosión, las estrellas se hubieran enfriado y apagado silenciosamente, guardando para sí los átomos que procesaron en su interior a lo largo de los millones de años que brillaron.

La conexión de la vida en nuestro planeta con las SN, es sólo una de las facetas apasionantes de su estudio. Los remanentes de las explosiones de SN también pueden ser el origen de los rayos cósmicos galácticos [1], son los grandes modificadores de la dinámica de las galaxias creando burbujas, túneles y chimeneas con tamaños de centenares de años luz, cambian en forma irreversible la física y la química en un gran espacio alrededor, induciendo la formación (y también la destrucción) de variadas especies moleculares y de polvo interestelar. Finalmente, los RSN forman algunas de las nebulosas más bellas que pueden verse en el cielo.

Cuando una estrella explota como SN, en instantes y en una región casi puntual del espacio se libera al espacio unos 10^{51} erg de energía térmica y mecánica, entre 5 y 10 masas solares de materia estelar salen eyectadas a velocidades de varios miles de km/s, en el momento de la explosión brilla como todas las estrellas de la galaxia anfitriona, como miles de millones de soles brillando en un punto (tal como puede apreciarse en la Fig. 1) y en el centro puede quedar latiendo una pequeña estrella hiper-compacta (y como se verá una de las formas más densas de la materia), y eventualmente hasta un agujero negro. Así las SN se convierten en laboratorios celestes invaluable para investigar la física de los extremos.

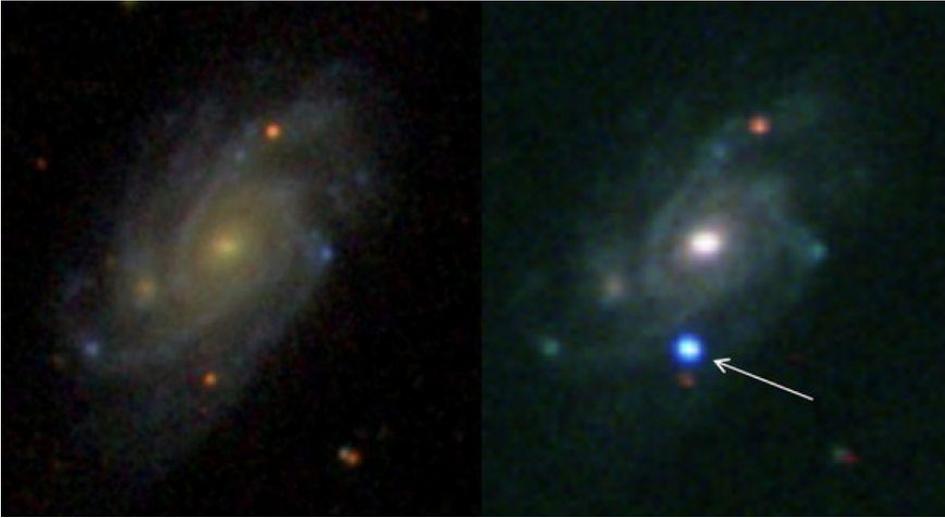


Fig. 1. Imagen de la galaxia UGC 9379 antes (izq.) y después (der.) de la explosión de la supernova catalogada como SN 2013cu, que ocurrió a 330 millones de años luz de la Tierra y fue detectada el 3 de mayo de 2013 por *el intermediate Palomar Transient Factory* (iPTF, un relevamiento robótico del cielo para descubrir muy tempranamente estos fenómenos). La explosión fue probablemente el resultado del colapso gravitacional de una estrella muy masiva, de tipo Wolf-Rayet (*Crédito: [2]*).

Brevemente, las SN vienen en dos modelos dependiendo de la masa de la estrella que colapsa. Las grandes estrellas con una masa típicamente mayor que 8 veces la masa del Sol, sufren un colapso gravitacional cuando hacia el final de sus vidas no les alcanza su combustible nuclear para contrarrestar con presión de radiación la tremenda fuerza de gravedad que tiende a compactarlas y el núcleo “implota”, las masivas capas externas rebotan en ese carozo hiperdenso y salen eyectadas el espacio a miles de km/s. En el centro se forma una estrella de neutrones¹ que puede quedar latiendo como un pulsar por millones de años. El pulsar, a su vez, inyecta al espacio poderosos campos magnéticos y partículas relativistas dentro de un haz estrecho (que puede detectarse desde Tierra como si fuese un faro en la Galaxia girando hasta miles de veces por segundo), y puede formar a su alrededor una nebulosa de viento de pulsar (NVP). Estas supernovas pertenecen a los tipos Ib, Ic y II. Las SNII, a su vez, se clasifican en SNII-L y SNII-P, según si la luz en los primeros meses decrece en forma lineal (L) o con forma de plateau (P).

Por otro lado, las estrellas de baja masa pueden vivir miles de millones de años (al ser más pequeñas la gravedad no es tan intensa y les basta con su combustible nuclear para sobrevivir mucho tiempo). Pero si son parte de un sistema binario formado, por ejemplo, por un par de estrellas enanas blancas, al final de sus vidas esa interacción puede desequilibrar a una de ellas y la lleva a sufrir un colapso termonuclear (por detonación o deflagración) y

¹ Una cucharita de material neutrónico puede pesar 10.000 millones de toneladas, y su campo magnético es unas 10 millones de veces más intenso que el campo terrestre.

explota por una reacción nuclear en cadena, imparable, que la desintegra completamente en fracción de segundos. Esta catástrofe estelar es uno de los eventos explosivos más energéticos del Universo. Se conocen como SN Ia y son las más brillantes. Al ser tan brillantes se las puede detectar hasta los confines del Universo visible, siendo una valiosa herramienta para investigar tamaño, forma y destino del mismo.

La deposición prácticamente instantánea de una enorme cantidad de energía y materia en un volumen muy pequeño, origina una onda explosiva en el plasma que se expande supersónicamente. Esa onda explosiva barre, comprime y calienta a temperaturas de millones de grados el gas circumestelar al principio y luego el medio interestelar. El borde delantero de esa perturbación se conoce como frente de choque, el cual actúa como una pared invisible a través de la cual cambian dramáticamente las condiciones físicas (densidad, temperatura, presión, etc.) del gas. Ese frente de choque se expande, barriendo como una topadora todo el material que encuentre a su alrededor creando una cáscara en expansión. La interfase entre los trozos de estrella eyectados y el gas interestelar chocado se denomina discontinuidad de contacto, la cual está normalmente sujeta a inestabilidades fluidodinámicas. En la expansión de la onda explosiva se crea también un choque inverso que marcha hacia el centro de la explosión. La estructura y los productos al momento de la explosión y durante la evolución (material estelar eyectado, los objetos centrales y la cáscara en expansión) constituyen lo que se denomina remanente de supernova (RSN). La Fig. 2 muestra en forma esquemática los distintos componentes descriptos.

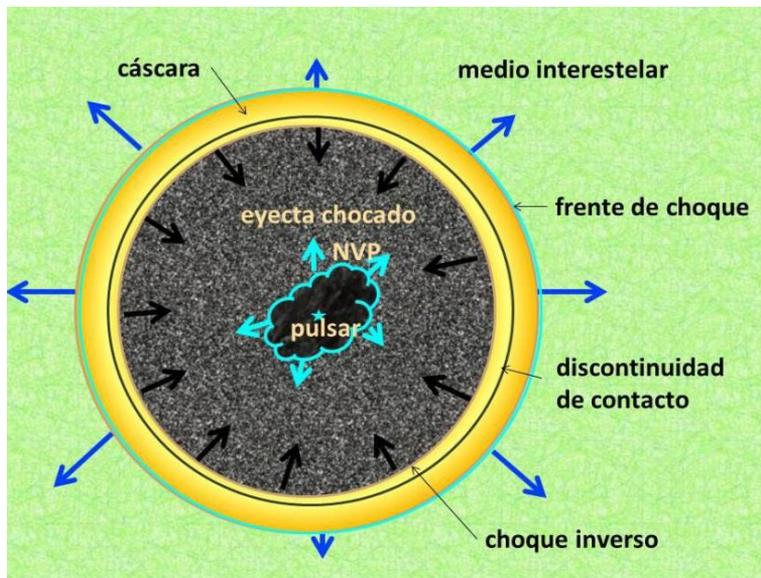


Fig. 2. Modelo esquemático de un remanente de supernova indicando las diferentes componentes. En este caso, al tener en su interior un pulsar y una NVP, corresponde al remanente de un colapso gravitacional (producto de SNIb, SNIc y SNII). Para el caso de un colapso termonuclear (SNIa), todo es idéntico, pero sin los componentes centrales.

2. Remanentes de Supernova

La apariencia real de los RSN en el espacio dista bastante en general del anillo simplificado ilustrado en la Fig. 2. Tanto la morfología como las propiedades físicas están determinadas por varios factores, tanto intrínsecos como extrínsecos. Los factores intrínsecos incluyen las características de la estrella precursora, el tipo de explosión que sufrió o la presencia de una estrella de neutrones. Entre las causas extrínsecas, las propiedades del medio ambiente en el que tiene lugar la expansión del RSN influyen fuertemente en su morfología y dinámica evolutiva. Un RSN expandiéndose en un ambiente de muy baja densidad (por ejemplo dentro de una burbuja creada previamente por los vientos de la estrella pre-supernova) seguramente conservará su apariencia cuasi-esférica por mucho más tiempo que un RSN expandiéndose entre nubes densas (por ejemplo cerca del complejo molecular en el que nació la estrella pre-supernova).

Históricamente los RSN se han clasificado en tres grandes grupos: los de tipo cáscara (una cáscara hueca formada por el material barrido por la onda de choque que emite radiación de sincrotrón); los de centro lleno (que son básicamente nebulosas creadas por las estrellas de neutrones, o NVP); los compuestos, que reúnen ambas características. En los últimos años se ha agregado un cuarto modelo, los RSN de morfología mixta (formados por una cáscara emisora de ondas de radio y el centro lleno de radiación X de origen térmico) [3, 4]. La naturaleza, sin embargo, es bastante más compleja y una gran proporción de RSN desafía cualquier clasificación morfológica.

En nuestra Galaxia, hay 294 RSN firmemente identificados [5]. Los RSN pueden radiar su energía a través de todo el espectro electromagnético, pero son principalmente radio fuentes. El 95% ha sido detectado con radiotelescopios (sólo 20 RSN de la Vía Láctea no han sido observados, o están pobremente definidos en radio). En tanto que en rayos X se detectó sólo el 40%, en luz visible un 30%, en rayos gamma en el rango de los GeV un 10% y sólo un 8 % fue descubierto emitiendo en los TeV. En tanto que en nuestras galaxias vecinas, las Nubes de Magallanes, sólo 4 de los 84 RSN identificados no fueron detectados aún en ondas de radio. Las observaciones con radiotelescopios son así una herramienta poderosa para investigar las características físicas y para descubrir nuevos RSN en nuestra Galaxia y en galaxias vecinas. Pero, como veremos a continuación, para comprender las propiedades de estos objetos que reúnen en sí trazas de la estrella precursora, peculiaridades del proceso explosivo que los formó, características del vecindario donde explotó y los rasgos adquiridos durante su evolución por la interacción de las ondas de choque con el medio interestelar (MIE) circundante, hacen falta todas las herramientas posibles, y cada banda del espectro electromagnético aporta información diferente y complementaria. Haremos entonces una recorrida por las diferentes visiones de los RSN, sin un orden particular salvo un listado del conocimiento que pueden aportar.

2.1. Los RSN en el rango óptico

En la banda de luz visible, los RSN se descubren por combinación de imágenes en la línea de $H\alpha$ y por emisión del S una vez ionizado (línea prohibida [SII]). Básicamente, si una nebulosa tiene un cociente de líneas $[SII]/H\alpha > 0.4$ y forma aproximadamente circular, es un RSN. Si, en cambio, se mide una tasa $[SII]/H\alpha \sim 0.1$ a 0.3 , probablemente se trate de una nebulosa fotoionizada o una nebulosa planetaria. Esto es porque la onda de choque en el MIE produce fuerte [SII] y otras líneas de baja excitación en la zona de enfriamiento y recombinación detrás del choque.

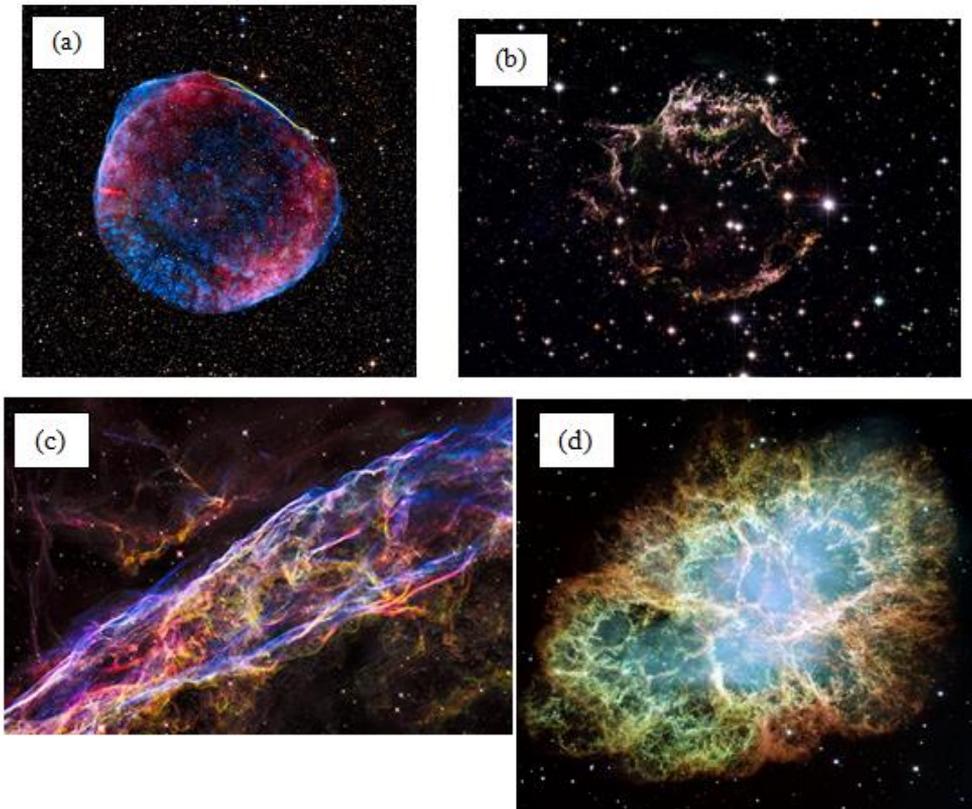


Fig. 3. (a) remanente de SN1006 observado en rayos X (mostrado en rojo y azul) y óptico (blanco), donde la fuerte emisión en líneas de Balmer en la delgada banda plana (ángulo superior derecho de la fuente) marca la interacción del choque con una nube fría de H; (b): RSN Cassiopea A observado con Hubble Space Telescope (HST) en tres líneas atómicas (S en rojo y lila, H y N en azul y O en verde). Como éste es un RSN muy joven (edad estimada en unos 300 años), lo que emite luz son los trozos de material estelar eyectado en la explosión (c): detalle de la emisión óptica del RSN Cygnus Loop en una porción de su periferia observada con HST. En rojo, H interestelar, en verde S excitado por choques y en azul O. Aquí la emisión reúne trazas del pasado, del vecindario y de la interacción actual. (d) Nebulosa del Cangrejo observada con HST. En azul la radiación continua, en rojo líneas de OIII y en verde SII. Es una red de filamentos térmicos producidos por fotoionización y por enfriamiento radiativo detrás del choque (*Créditos: NASA-ESA; STScI, NASA; y J. J. Hester, Arizona State U./NASA NASA, ESA and Allison Loll/Jeff Hester, Arizona State University, respectivamente*).

Cuando el espectro está dominado por líneas de Balmer del H, está indicando que son choques de alta velocidad, no radiativos, que se propagan en medios parcialmente neutros. Estos estudios son muy útiles para conocer la velocidad de expansión del frente de choque. Cuando se detecta mucha emisión de O, es muy probable que sean RSN jóvenes, donde la presencia del material de la estrella precursora todavía es muy notable (más tarde, por la expansión del RSN ese material histórico se diluye en el espacio y no se detecta más). En otros casos, lo que brilla en forma de filamentos emitiendo distintas líneas, no es el RSN mismo, sino el MIE que fue chocado y se está enfriando radiativamente (es una emisión caracterizada por la presencia de líneas prohibidas). La Fig. 3 ilustra distintos orígenes de la emisión óptica asociada a RSN.

A partir de observaciones en el óptico se puede conocer la composición de la estrella precursora, la localización y velocidad del frente de choque, la existencia de simetrías/asimetrías en la explosión (y de allí comprender el mecanismo más probable que llevó a la destrucción de la estrella), la composición del gas circundante, etc.

2.2. Los RSN en infrarrojo (IR)

La emisión IR que se observa en RSN tiene distintas componentes. Entre otros, puede ser radiación de sincrotrón o continuo térmico (gas calentado a temperaturas para emitir como cuerpo negro en la banda infrarroja). Por regla general, si la emisión IR correlaciona espacialmente con emisión en rayos X es seguramente radiación producida por polvo calentado colisionalmente en el gas chocado. Si correlaciona con filamentos ópticos, debe ser polvo calentado radiativamente dentro de los filamentos. Además del continuo térmico emitido por polvo calentado, el gas chocado (externo al RSN) se enfría a través de la emisión de líneas atómicas y moleculares que pueden caer en el rango de IR cercano o medio. La detección de líneas IR de hidrógeno molecular traza regiones de interacción entre RSN y nubes moleculares. También con telescopios infrarrojos se puede detectar líneas atómicas de estructura fina: CII, NII, NIII, OI, OIV, FeII, etc. (choques rápidos en gas moderadamente denso). La Fig. 4 muestra ejemplos de emisión infrarroja observada en RSNs ilustrando distintos orígenes.

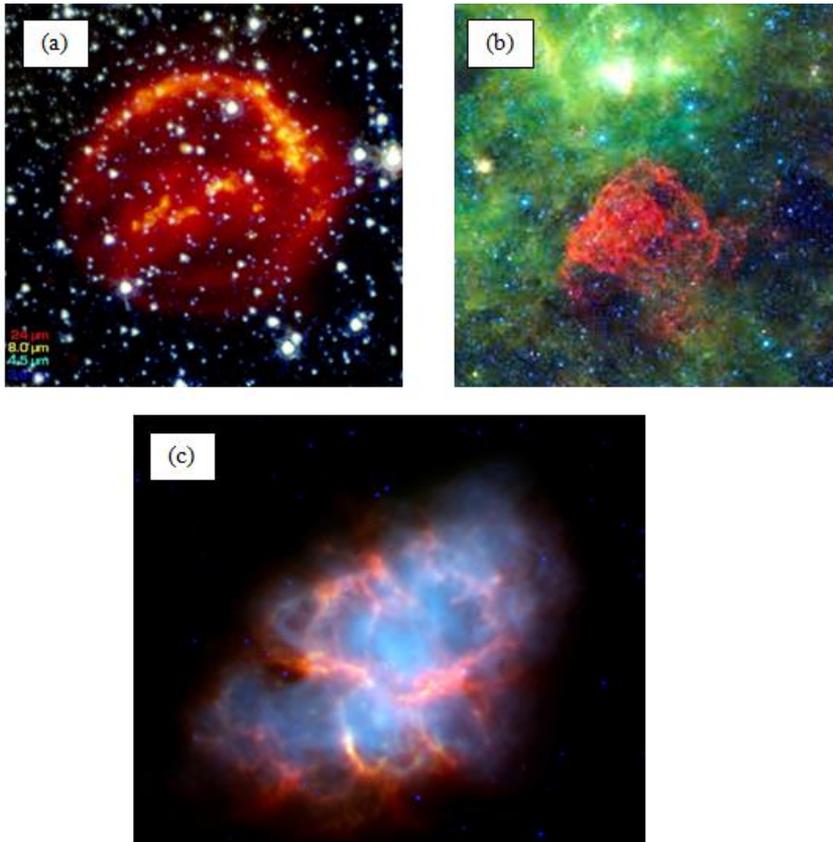


Fig. 4. (a) El RSN de Kepler observado con el satélite Spitzer en 24 μm (rojo), 8 μm (amarillo) 4.5 μm (cyan) y 3.6 μm (azul). Se observa polvo de origen circum-e inter-estelar calentado por el choque del RSN. (b) El RSN Puppis A (los filamentos rojos) observado con WISE en 4 bandas IR (3.4 y 4.6 μm en azul y cyan, son principalmente estrellas; en 12 y 22 μm (verde y rojo) corresponde a polvo calentado por choques. (c) La Nebulosa del Cangrejo observada con el telescopio Spitzer en una combinación de emisión de sincrotrón (azul) y emisión térmica. (Créditos: NASA,ESA/JPL-Caltech/ R. Sankrit & W. Blair; NASA/JPL-Caltech/UCLA y [6], respectivamente)

A partir de las observaciones en el infrarrojo se puede conocer: la presencia de polvo y de allí investigar el rol de las SN en formación/destrucción de granos de polvo; se pueden identificar sitios de interacción del frente de choque con MIE denso y estimar temperatura, tamaño, composición del polvo chocado.

2.3. Los RSN en rayos X

En los RSN de tipo “cáscara”, la emisión en rayos X tiene forma de cáscara hueca (con geometría bastante circular si se trata de remanentes jóvenes, donde las inhomogeneidades del MIE no los afectaron demasiado todavía), pero la emisión en esta banda espectral puede tener dos orígenes físicamente muy distintos. Puede tratarse de emisión térmica originada en un

plasma ópticamente fino calentado a $T \sim 10^6$ K por el pasaje de la onda de choque (como se observa por ejemplo en el RSN Cassiopea A, Fig. 5a).

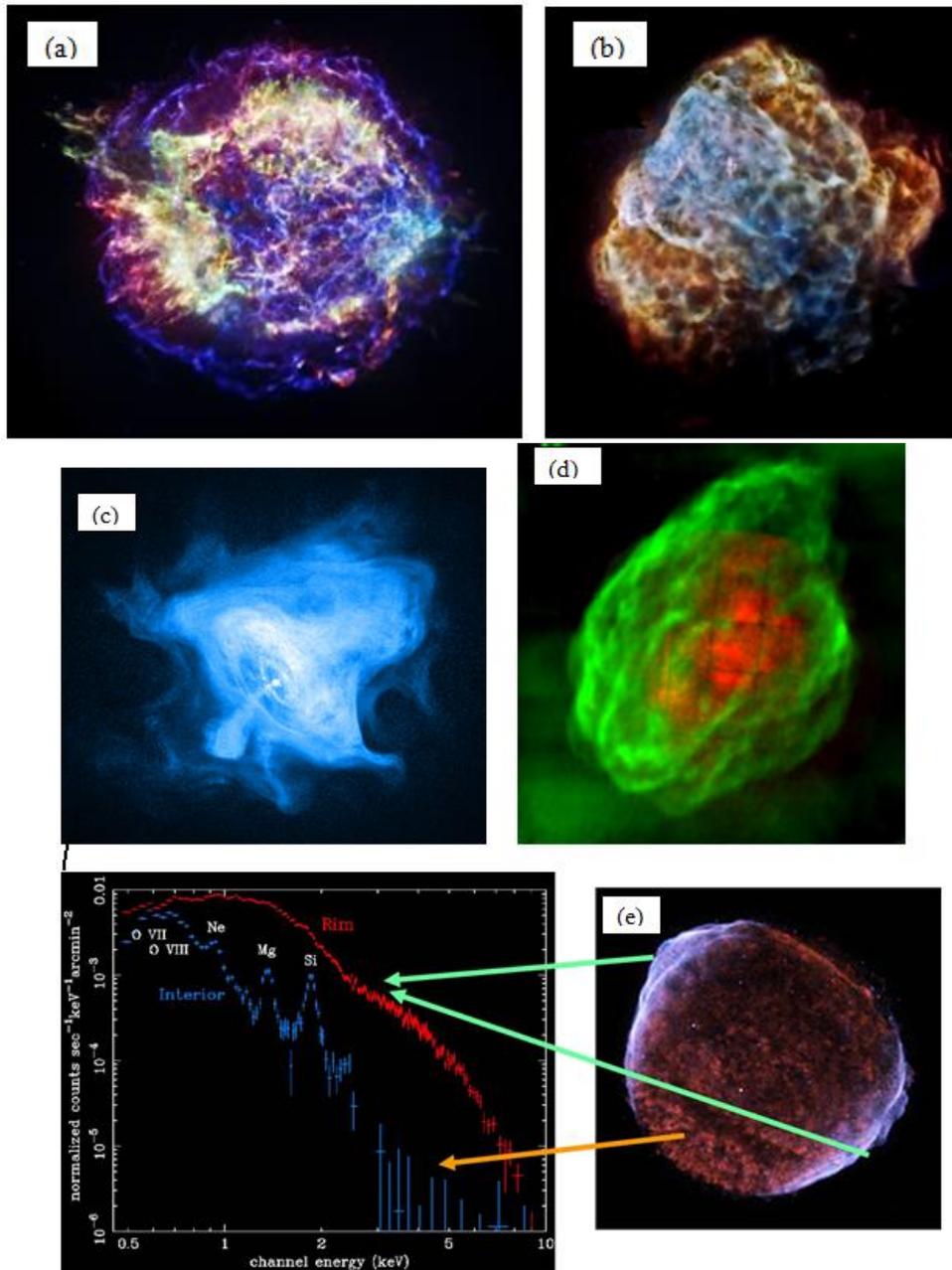


Fig. 5. (a) El RSN Cassiopea A observado en distintos rangos de energía en rayos X por el telescopio Chandra. (b) Puppis A observado por Chandra y XMM-Newton en distintas bandas de energía en rayos X. (c) imagen profunda del centro de la Nebulosa del Cangrejo en rayos X donde se observa la estrella de neutrones central y un jet, (d) RSN W44 observado en radio (en verde) y en rayos X (en rojo), (e) SN1006, imagen y espectros: Emisión no térmica (en azul) y térmica (en rojo). Las líneas de emisión de especies altamente ionizadas como C, N, O, Fe, Ne Mg, Si, S y Ca, son excitadas por el pasaje de una onda explosiva en el MIE (Créditos: NASA/CXC/MIT/UMass Amherst/M.D.Stage et al.; [7]; [8]; [9] y [10], respectivamente).

Este tipo de emisión a veces muestra estructuras muy complejas, como en el caso del RSN Puppis A (Fig. 5b), donde la emisión tiene una estructura “celular” debido a la expansión del frente de choque en un medio probablemente muy inhomogéneo.

Pero también hay cáscaras que emiten rayos X de origen no térmico, por radiación de sincrotrón, a partir de electrones acelerados hasta velocidades relativistas orbitando en líneas de campo magnético intenso (como en el remanente de la SN1006, que en la Fig. 1a aparece desplegada en una combinación de luz visible en blanco, rayos X duros de origen no térmico en azul, y rayos X blandos, de naturaleza térmica en rojo). En el caso de los RSN de “centro lleno” o PWN, la radiación X es puramente no-térmica, alimentada por la estrella de neutrones central (como en la Nebulosa del Cangrejo, Fig. 5c). En los RSN de morfología mixta, la cáscara envolvente emite en ondas de radio, y el plasma interior, de baja densidad y muy caliente, emite radiación X térmica (como en el RSN W44, Fig. 5d).

A partir de observaciones en rayos X se puede conocer: la existencia de simetrías/asimetrías en la explosión; la composición de la estrella precursora y si hubo mezclas convectivas de especies atómicas; la temperatura, composición, distribución y estado de ionización del material sintetizado y eyectado en la explosión y del MIE y circumestelar; la localización y velocidad de expansión del frente de choque. Estas observaciones también permiten poner cotas sobre mecanismos de aceleración de partículas.

2.4. Los RSN en rayos gamma

Esta es la ventana más nueva de exploración de RSN. Hasta la fecha se han identificado 62 fuentes en el rango de los TeV asociadas a eventos explosivos (RSN interactuando con nubes moleculares, cáscaras, pulsares, nebulosas de viento de pulsares, etc.) y 30 fuentes GeV (1 – 100 GeV) que son probables RSN + 14 marginalmente asociadas.

La radiación con energías del orden de los TeV pueden producirse a través del scattering Compton inverso de fotones (principalmente del fondo cósmico) por electrones relativistas acelerados por el fuerte choque del RSN [11], o también por bremsstrahlung no térmico de electrones chocando con gas ambiente. Ambos son mecanismos leptónicos (como el caso ilustrado en la Fig. 6). Otra vía de producción de emisión TeV es a través del decaimiento de piones neutros creados por colisiones protón-protón (entre protones relativistas y protones del medio ambiente denso). Este sería un origen hadrónico de la emisión [11]. Hay, sin embargo, una ambigüedad experimental en la población de partículas responsable por la emisión y tanto la emisión de origen leptónico, como hadrónico pueden igualmente ajustar la distribución espectral de energía observada.

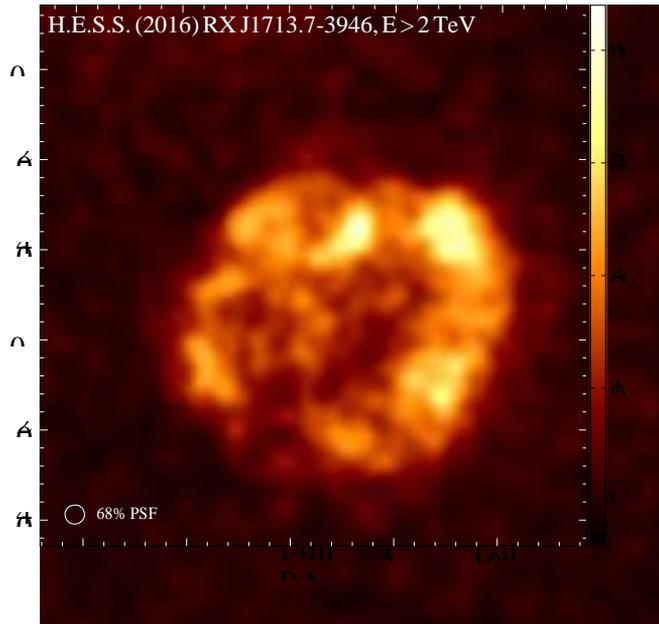


Fig. 6: Mapa H.E.S.S. de emisión de rayos gamma en el rango de los TeV del RSN RX J1713.7-3946 (Crédito: [12]).

2.5. Los RSN en ondas de radio

Antes de la existencia de la radioastronomía, se conocían sólo 2 RSN (los remanentes históricos del Cangrejo y de Kepler). Las observaciones de RSN con radiotelescopios revolucionaron el conocimiento de estas fuentes. Los estudios de RSN realizados con radiotelescopios permiten investigar la morfología, delimitar la ubicación actual del frente de choque en expansión, conjeturar los efectos de la interacción con el MIE circundante, identificar los sitios de aceleración de partículas a través del estudio de variaciones en el espectro, e investigar el acoplamiento entre el viento relativista de la estrella de neutrones central y el plasma circundante. Por otro lado, al ser la radiación de sincrotrón linealmente polarizada por naturaleza, las observaciones en radio permiten inferir (tras corregir por rotación de Faraday) la orientación y el grado de orden de los campos magnéticos. Conociendo la distancia a la fuente, esta información de carácter más cualitativo, puede convertirse en parámetros físicos cuantitativos como edad, tamaño, energía, etc. e investigar su estado evolutivo y su relación con el entorno.

Entre toda la información física que se puede extraer analizando observaciones en ondas de radio de los RSN, el estudio de la morfología es particularmente relevante, ya que en la mayoría de los casos el único intervalo del espectro que revela a los RSN en toda su extensión es en ondas de radio. Además, utilizando radio-interferómetros se pueden investigar la distribución de brillo y estructuras con una resolución espacial similar a las del óptico o rayos X.

El análisis de la distribución de brillo de la emisión de sincrotrón puede aportar evidencias sobre el antes (como la existencia de simetrías en la explosión misma) y el después (si hay deformaciones por interacción del choque con nubes externas) de la explosión. La Fig. 7 ilustra diferentes morfologías de RSN observados en ondas de radio con alta resolución angular.

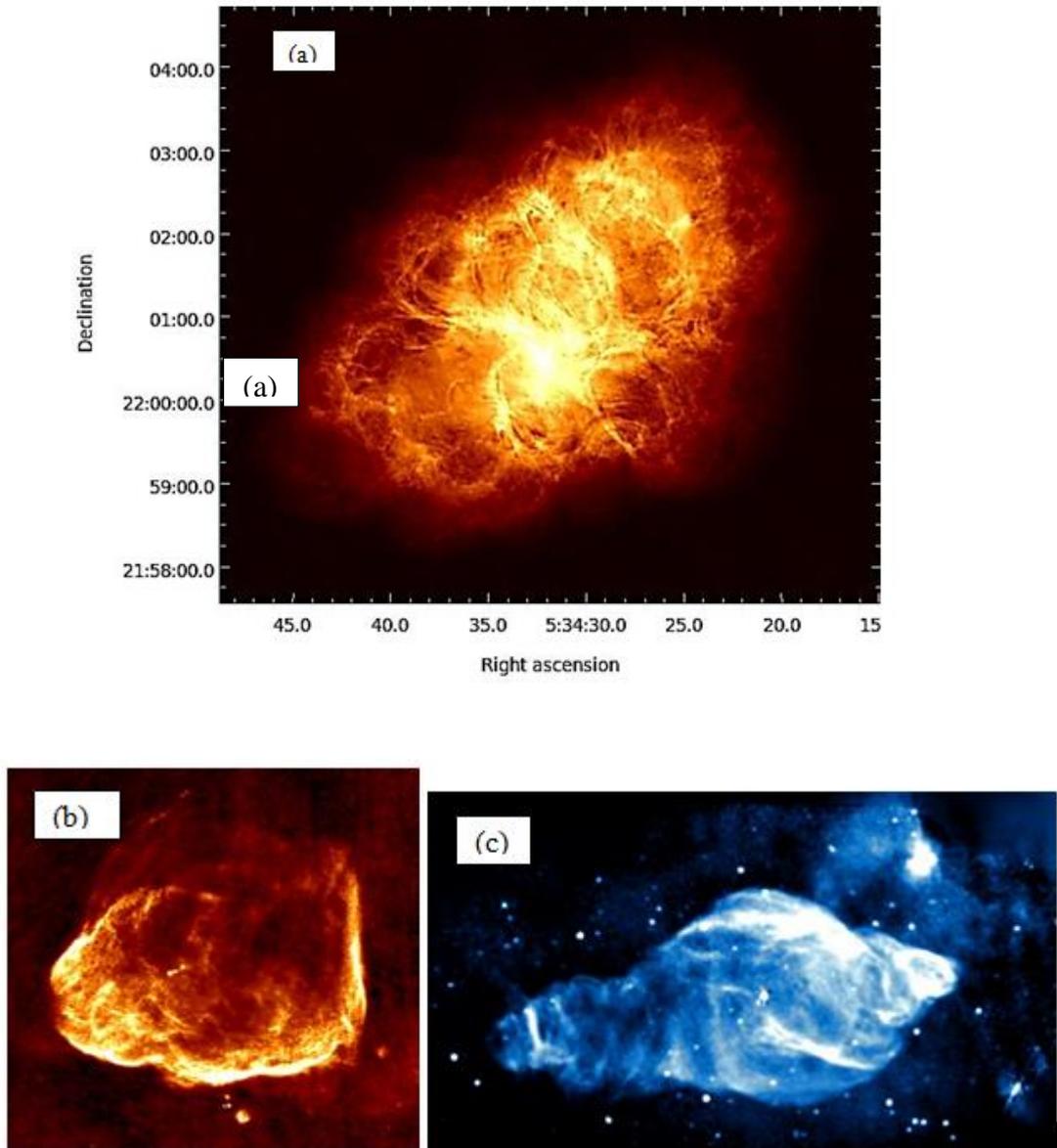


Fig. 7: (a) La Nebulosa del Cangrejo observada con el radiotelescopio Very large Array (NRAO) con una resolución angular mejor que el segundo de arco, donde se pueden resolver los filamentos y arcos de origen magnético que emiten radiación alimentada por el pulsar central. (b) RSN G18.8-0.3 en ondas de radio. (c) RSN W50 observado con VLA; el remanente quasi-esférico está deformado por la acción de dos jets inyectados por el objeto compacto central SS433 (posible agujero negro) (Créditos: [13]; The VLA FIRST Survey; y [14], respectivamente.)

3. Conclusiones

Como se ha intentado describir muy brevemente, el estudio de los RSN es multifacético y permite abordar experimentalmente algunos de los problemas más complejos de la física ya que ofrecen laboratorios con condiciones imposibles de alcanzar en Tierra. Son uno de los fenómenos más energéticos del Universo, son prácticamente la única vía de acceso para conocer el interior de las estrellas, en el transcurso de su evolución muestran la acción de ondas de choque con números de Mach 10 a 100 veces superiores a los de laboratorio e interactuando con plasmas de densidades, temperaturas y presiones muy variados. Todas esas condiciones se reflejan en emisiones muy diferentes a lo largo de todo el espectro electromagnético, y el análisis de su interrelación es una de las fuentes más ricas de investigación de la física y la química del espacio. El estudio de los RSN es un campo en constante expansión en la investigación astrofísica actual.

En el Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE, CONICET-UBA) Argentina hay un grupo de investigadores que desde hace varias décadas aborda este estudio utilizando los mejores telescopios del mundo, tanto terrestres como espaciales, para investigar los RSN y su impacto en el gas interestelar que los rodea.

Agradecimientos

Agradezco muy especialmente a la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales por el premio que me otorgó.

Referencias

- [1] G.M. Castelletti, *Anales Acad. Nac. Cs. Ex., Fís. Nat.* 64, 73 (2012).
- [2] A. Gal-Yam, I. Arcavi, E.O. Ofek, S. Ben-Ami, S.B. Cenko, M.M. Kasliwal, Y. Cao, O. Yaron, D. Tal, J.M. Silverman, y 10 co-autores, *Nature* 509, 471 (2014).
- [3] G.M. Dubner & E. B. Giacani, *Astronom. Astrophys. Rev.* 23, 3 (2015).
- [4] G.M. Dubner, En: *Handbook of Supernovae* (A. W. Alsabti y P. Murdin, Eds.), Springer International Publishing, Suiza. DOI: 10.1007/978-3-319-20794-0_91-1, en prensa.
- [5] D.A. Green, *A Catalogue of Galactic Supernova Remnants*, <http://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/snrs/> (2014).
- [6] T. Temim, R. Gehrz, C. Woodward, T. Roellig, N. Smith, L. Rudnick, E. Polomski, K. Davidson, Y. Lunming & T. Onaka, *Astronom. J.* 132, 1610 (2006).
- [7] G. Dubner, N. Loiseau, P. Rodriguez-Pascual, M.J.S. Smith, E. Giacani,

- & G. Castelletti, *Astronom. Astrophys.* 555, 9 (2013).
- [8] F. Seward, W. Tucker & R. Fesen, *Astrophys. J.* 652, 1277 (2006).
- [9] E. Giacani, G. Dubner, N. Kassim, D. Frail, W.M. Goss, P. Winkler, & B. Williams, *Astronom. J.* 113, 1379 (1997).
- [10] R. Shelton, K. Kuntz & R. Petre, *Astrophys. J.* 611, 906 (2004).
- [11] F. Aharonian & HESS Collaboration, *Astronom. Astrophys.* 449, 223 (2006).
- [12] HESS Collaboration, *Astronom. Astrophys.*, en prensa (astro-ph.HE 1609.0867) (<https://arxiv.org>).
- [13] G. Dubner, G. Castelletti, O. Kargaltsev, G.G. Pavlov, M. Bietenholk, & A. Talavera, *Astrophys. J.*, 840, 82.
- [14] G. Dubner, M. Holdaway, M. Goss & I.F. Mirabel, *Astronom. J.* 116, 1842 (1998).

Manuscrito recibido el 17 de abril de 2017.

Aceptado el 28 de abril de 2017.