

REMANENTES DE SUPERNOVA: PROPIEDADES ESPECTRALES Y SU CONEXIÓN CON LA PRODUCCIÓN DE RAYOS CÓSMICOS

Gabriela Castelletti

Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE, CONICET-UBA), Casilla de Correo 67 - Suc. 28,
C1428ZAA-Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
E-mail: gcastell@iafe.uba.ar

Resumen

Los remanentes de supernova (RSNs) son una de las principales fuentes de inyección de energía en las galaxias y grandes modificadores de la dinámica del medio interestelar (MIE). La radiación proveniente de RSNs, observada desde las ondas de radio hasta los rayos gamma, no sólo muestra que estos objetos son aceleradores eficientes de partículas hasta energías de los TeV sino que aporta evidencias contundentes en favor de la idea por la cual los RSNs serían, en nuestra Galaxia, fuentes naturales de los rayos cósmicos (RCs) que bombardean nuestro planeta. En este trabajo presento una puesta al día de los resultados observacionales relacionados con la producción de partículas altamente energéticas en RSNs galácticos, así como también una revisión del marco teórico vigente incluyendo una discusión detallada de algunos interrogantes pendientes de solución.

Palabras clave: remanentes de supernova, emisión sincrotrónica en radio, rayos X, rayos gamma, rayos cósmicos.

Abstract

Supernova remnants: multispectral properties and their connection with production of cosmic rays. Supernova remnants (SNRs) are one of the principal sources of energy input into galaxies and great modifiers of the dynamics of the interstellar medium (ISM). The radiation from SNRs, observed from radio to gamma rays, not only shows that these objects are efficient particle accelerators up to TeV energies, but also provide strong evidence favoring the idea that SNRs would be natural galactic sources of cosmic rays (CRs) that bombard the Earth. In this work I present an update of the observational results related to the production of highly energetic particles in galactic remnants as well as a revision of the existing theoretical framework including a discussion about some important pending solution questions.

Key words: supernova remnants, radio synchrotron emission, X-rays; gamma-rays, cosmic rays.

I. Introducción

Los remanentes de supernova (RSNs) son creados tras el colapso termonuclear o gravitacional producido al finalizar la evolución de estrellas masivas (con masas superiores a 8 masas solares) o enanas blanca formando parte de un sistema binario. En cualquier caso, el colapso estelar es inexorablemente seguido por la explosión de la estrella como supernova (SN). Tales

eventos, implican una inyección prácticamente instantánea de unos 10^{51} erg en el medio interestelar (MIE) y la creación de poderosas ondas de choque, caracterizadas por números de Mach altos, que no sólo comprimen y calientan el material barrido a su paso, sino que además son capaces de acelerar partículas a muy altas energías.

Desde hace más de seis décadas, los frentes de choque en los RSNs ocurridos en nuestra Galaxia han sido considerados responsables de la producción de rayos cósmicos (RCs) hasta energías de 10^{15} eV [1]. Los rayos cósmicos, compuestos principalmente por protones, electrones y núcleos atómicos, serían inyectados al medio interestelar luego de ser acelerados en el frente de choque del remanente. Por tratarse en su mayoría de partículas cargadas, sus trayectorias son alteradas por la presencia de campos magnéticos en el medio interestelar, lo cual dificulta enormemente la determinación de la dirección de arribo de estas partículas. Si bien en los últimos años la evidencia observacional a favorecido la interpretación de los RSNs galácticos como aceleradores de RCs, aún son muchos los interrogantes por responder, y por tal razón esta idea es todavía materia de discusión.

En este trabajo describo los resultados obtenidos al observar la emisión proveniente de RSNs, cubriendo el espectro electromagnético desde las ondas de radio hasta los poderosos rayos gamma, que brindan una evidencia indiscutible sobre los procesos de aceleración de partículas en RSNs y su conexión con la producción de rayos cósmicos galácticos. Sobre la base de estos resultados, analizo los alcances y limitaciones de las predicciones teóricas vigentes.

II. Propiedades Morfológicas y Espectrales de los RSNs

Los RSNs creados por el colapso gravitacional de una estrella masiva pueden albergar los objetos más densos posibles en el Universo, como las estrellas de neutrones (que pueden detectarse como pulsares) o los enigmáticos agujeros negros. Contrariamente, en los eventos de SN producidos por el colapso termonuclear de una enana blanca en un sistema binario, la estrella progenitora es completamente destruida y como resultado de la explosión no queda ningún remanente compacto.

La morfología y distribución de brillo en los remanentes de supernova, tal como es observado en los diferentes regímenes espectrales, se debe tanto a factores intrínsecos como extrínsecos. Los primeros incluyen, por ejemplo, el mecanismo y geometría de la explosión de la estrella progenitora así como la presencia de una estrella de neutrones inyectando partículas relativistas y campos magnéticos intensos en el interior del remanente. Por otro lado, inhomogeneidades presentes en el material interestelar que rodea el remanente, tales como nubes densas o cavidades, pueden modificar la expansión del frente de choque de la supernova. Estos factores internos y externos al combinarse impactarán directamente en la evolución del RSN a lo largo de decenas a centenares de miles de años.

La mayor parte de los RSNs conocidos al presente fueron descubiertos por su emisión no térmica (sincrotrón) en longitudes de onda de radio producida por las partículas aceleradas que se acoplan con el campo magnético comprimido detrás del frente de choque o en la estrella de neutrones que pudiera estar presente en su interior, o en ambos. Si bien la emisión sincrotrónica en radio constituye la marca característica de los RSNs, estos objetos pueden ser también observados en el resto de las bandas del espectro electromagnético, desde el óptico hasta los energéticos rayos gamma. En efecto, el enfriamiento radiativo del gas comprimido y la excitación colisional del material en la interacción entre el frente de choque y las nubes interestelares dan lugar a la formación de delgados filamentos ópticos brillantes. La emisión en rayos X puede observarse en la banda de rayos X blandos y/o duros. La radiación

térmica en rayos X blandos es producida por el proceso de emisión conocido como bremsstrahlung térmico¹ y por la emisión de especies ionizadas de elementos tales como carbono, nitrógeno, oxígeno, hierro, neón, magnesio, etc, producida en el interior de los RSNs a varios millones de grados. La emisión de los rayos X duros, por su parte, es la contraparte no térmica de la radiación observada en ondas de radio. En el infrarrojo, la emisión proviene del polvo interestelar calentado por el avance del frente de choque. Finalmente, en los últimos años han sido asociadas a RSNs fuentes de muy alta energía emitiendo en rayos gamma, originadas por la interacción del frente de choque con nubes moleculares densas o por la presencia de una estrella de neutrones.

III. Aceleración de Partículas en RSNs

El vínculo entre los restos de supernova y la aceleración de partículas se describió hace poco más de 50 años tras el descubrimiento de la radiación sincrotrónica en ondas de radio de electrones relativistas con energías de hasta los GeV en el remanente de Tycho [2]. Posteriormente, en las décadas del 70 y 80 el desarrollo teórico de los procesos difusivos de aceleración de partículas (DSA, *Diffusive Shock Acceleration*) en los frentes de choque astrofísicos, definitivamente estableció un nexo entre los RSNs y la producción de partículas aceleradas [3,4]. En este modelo, el incremento de energía de las partículas cargadas es explicado en forma sencilla sobre la base de colisiones estocásticas que éstas experimentan con turbulencias presentes en el campo magnético. Las sucesivas colisiones hacen que las partículas crucen el frente de choque repetidas veces, incrementando su energía en cada cruce. Si bien esta teoría ha explicado exitosamente muchos de los resultados obtenidos al observar RSNs, existen casos que no pueden ser descritos adecuadamente por el modelo difusivo original. Por esta razón, algunos autores han considerado la conveniencia de incluir en el mecanismo de aceleración difusiva la generación de turbulencia magnética por partículas aceleradas y los efectos causados por la reacción de las partículas aceleradas sobre la estructura del frente de choque [5,6,7,8].

Desde el punto de vista observacional, los datos obtenidos en diferentes bandas del espectro electromagnético confirman que el mecanismo de aceleración resulta ser un proceso eficiente que se mantiene activo en los diferentes estados evolutivos de los RSNs, produciendo en algunos casos partículas con energías de hasta unos 100 TeV [9,10,11]. Por ejemplo, la emisión observada en ondas de radio proveniente de RSNs demuestra que los electrones son acelerados en el frente de choque hasta energías de al menos 1 GeV. Por otro lado, la emisión sincrotrónica en rayos X duros y la emisión gamma detectada en algunos remanentes galácticos en el rango de energías entre los GeV y los TeV, constituye una información complementaria importante en favor de la producción de electrones acelerados y posiblemente también partículas hadrónicas en estos objetos [12].

Recientemente, la detección, utilizando los telescopios orbitales *Chandra*, *XMM-Newton* y *Suzaku*, de filamentos delgados emitiendo radiación sincrotrónica en rayos X en las cercanías del frente de choque de algunos restos de supernova (SN1006, Cas A, Tycho, etc, ver Sec. VI), ha sido interpretada como una evidencia de que las partículas aceleradas difusivamente pueden generar campos magnéticos turbulentos cuyas intensidades (con valores entre $\sim 100 \mu\text{G}$ y 1 mG) superan ampliamente los valores del campo magnético presente

¹El bremsstrahlung térmico es el proceso de emisión de radiación producido cuando una partícula cargada (por ejemplo un electrón) en movimiento curva su trayectoria debido a la presencia de una segunda partícula cargada (por ejemplo un ión). El cambio en la trayectoria de la partícula incidente modifica su velocidad, correspondiéndose esto con la emisión de energía en forma de un fotón cuya longitud de onda depende de la interacción entre las partículas.

inicialmente en el medio interestelar (el cual nunca es mayor a unos pocos μG) [13]. La emisión gamma, por su parte, detectada en el rango de energía de los TeV por telescopios Cherenkov, como H.E.S.S., MAGIC, VERITAS, etc y en el rango de los GeV por los telescopios espaciales AGILE y *Fermi*-Large Area Telescope (LAT) (ver Sec. VI) puede ser explicada como el resultado de interacciones hadrónicas (protón-protón) entre las partículas aceleradas y el medio interestelar denso barrido por el frente de choque del RSN con producción y subsecuente decaimiento de piones neutros. No obstante, existe también un escenario leptónico alternativo en el cual la producción de rayos gamma se debe a *scattering* por Compton inverso de electrones relativistas sobre un fondo de fotones. La detección de emisión gamma es, entonces, sólo una pieza del rompecabezas, pues por sí misma es incapaz de determinar sin ambigüedad cuál de los dos escenarios mencionados originan los rayos cósmicos observados. Si bien existen en la actualidad algunos RSNs para los cuales el origen de tal emisión ha sido determinado con claridad, en la mayor parte de los objetos asociados a fuentes gamma la naturaleza de la emisión a energías tan elevadas no ha sido confirmada. Es en este punto donde la observación del medio interestelar en ondas de radio submilimétricas, para determinar posibles sitios de interacción entre el frente de choque en expansión y nubes densas, así como la búsqueda y detección de fuentes pulsantes en radio y/o rayos X, proporciona una herramienta crucial para discernir cuál es el mecanismo que domina la emisión gamma observada.

IV. El Paradigma de los RSNs

Para los RSNs, el espectro de la radiación sincrotrónica detectada en la banda de radio está caracterizado por una única ley de potencia $S_\nu \propto \nu^\alpha$, donde S_ν es la densidad de flujo integrada sobre el objeto y ν es la frecuencia de observación. El estudio espectral de RSNs en esta ventana del espectro electromagnético constituye un poderoso diagnóstico sobre los mecanismos de aceleración de partículas en los frentes de choque, pues permite trazar la distribución de energía $N(E)$ ($N(E) \propto E^{-\gamma}$, $\gamma = 1-2\alpha$) de los electrones relativistas responsables de la radiación observada. Desde un punto de vista teórico, la propiedad más atractiva que posee el modelo de aceleración difusiva de partículas radica en que, en el caso de frentes de choque intensos como los que tienen lugar durante la evolución de los RSNs, éste reproduce de manera simple el comportamiento espectral (caracterizado por una ley de potencia con un índice cercano a $\gamma \approx 2$) observado en los rayos cósmicos galácticos. Esta propiedad, sumada a una tasa de ocurrencia en nuestra Galaxia de 2 a 3 explosiones de SN por centuria [14], y considerando la enorme cantidad de energía liberada en cada uno de estos eventos ($E \sim 10^{51} \text{ erg}$)² [15], hacen de los RSNs las únicas fuentes naturales capaces de producir electrones, protones e iones acelerados hasta energías de 106 GeV (lo que se conoce como la “rodilla” en el espectro de rayos cósmicos). Con el transcurso del tiempo esta idea se ha transformado en un paradigma, el llamado “*paradigma de los RSNs*”, en el cual los rayos cósmicos resultan de partículas aceleradas mediante procesos difusivos en el frente de choque de los RSNs que, dependiendo de la energía alcanzada en este proceso, logran escapar y se propagan difusivamente en la Galaxia. Si bien la propagación difusiva de los rayos cósmicos en la Galaxia puede ser demostrada observacionalmente, todavía existen varios aspectos básicos poco comprendidos en el paradigma, los cuales sugieren la falta de completitud en los modelos físicos vigentes (ver Sec. V).

²En relación al contenido energético necesario para la producción de rayos cósmicos, sería en verdad suficiente considerar al menos entre el 10 y el 20% de la energía cinética en el frente de choque para producir en forma eficiente el flujo de rayos cósmicos observado en la Tierra.

V. Interrogantes Pendientes de Solución

Como fuera mencionado anteriormente, el mecanismo de aceleración difusiva adoptado usualmente predice, para las partículas aceleradas en choques intensos, un espectro de energía $\sim E^{-\gamma=2}$. No obstante, este comportamiento espectral no es consistente con el observado en algunos RSNs en el rango de energía de los rayos gamma, cuya emisión proviene del decaimiento de piones neutros originados en colisiones inelásticas protón-protón (origen hadrónico). En este caso, los valores observados para el índice espectral γ se encuentran entre 2.3 y 3, según se trate de remanentes jóvenes o evolucionados³, respectivamente [12]. Este inconveniente persiste incluso al considerar otros marcos teóricos más complejos comparados con el modelo standard de aceleración difusiva, los cuales incorporan, por ejemplo, el tratamiento de no linealidades causadas por la reacción dinámica de las partículas aceleradas en la estructura del frente de choque. Estos modelos, predicen espectros aún inferiores ($\gamma < 2$) a los obtenidos al considerar el modelo standard [16]. Existe entonces una fuerte necesidad de reconciliar los modelos teóricos con la gran cantidad de datos observacionales proporcionados por las nuevas generaciones de experimentos en la banda de rayos gamma y por los conocimientos actuales sobre la propagación de RCs en la Galaxia. En este sentido, muy recientemente se han dado a conocer nuevos desarrollos teóricos los cuales intentan resolver las inconsistencias espectrales incluyendo en la teoría los efectos que la amplificación de la intensidad del campo magnético produce sobre el *scattering* de rayos cósmicos en el frente de choque de RSNs [12,17].

Además del problema espectral mencionado, las teorías propuestas aún presentan dificultades para establecer respuestas a aspectos tales como, cuál es la cantidad mínima de energía necesaria para que las partículas sean inyectadas eficientemente en el proceso de aceleración y qué parámetros físicos (número de Mach en las ondas de choque, intensidad y distribución del campo magnético, geometría del frente de choque, etc.) regulan la eficiencia del proceso de aceleración. Por otro lado, si bien no existe duda alguna sobre la importancia que la detección de la radiación gamma asociada con RSNs ha tenido para demostrar el rol que desempeñan estos objetos en la producción de partículas altamente energéticas, en muchos de los casos observados hasta el presente las incertezas relacionadas con la distribución del gas ambiente, junto con la pobre resolución angular de los instrumentos operando en rayos gamma, impiden establecer sin ambigüedad el origen de la emisión a tan altas energías. Un ejemplo claro de esta situación es el RSN G338.3+0.0 (ver Fig. 1). En este caso, las observaciones en ondas de radio no han confirmado la presencia del objeto compacto detectado en rayos X, al cual algunos autores adjudican el origen de la emisión en rayos gamma [18]. Desafortunadamente, los datos existentes del medio interestelar circundante a este remanente no poseen la calidad necesaria para aportar evidencias sólidas sobre un posible origen hadrónico de la emisión detectada a altas energías [19]. En relación a la producción de RCs, aún es necesario comprender cabalmente el modo en el cual éstos escapan de los RSNs para ser inyectados al medio interestelar. La descripción actual de este proceso es principalmente cualitativa. Básicamente, se espera que primero escapen los RCs de mayor energía y luego, progresivamente en el tiempo, a medida que disminuye la velocidad de expansión del frente de choque, se espera escapen los RCs de menor energía [20].

³La determinación de la edad de un RSN es estimativa. Básicamente, un remanente puede ser considerado joven o evolucionado si la explosión de SN que lo origina ocurrió hace menos de 2000 años o más de 10000 años, respectivamente.

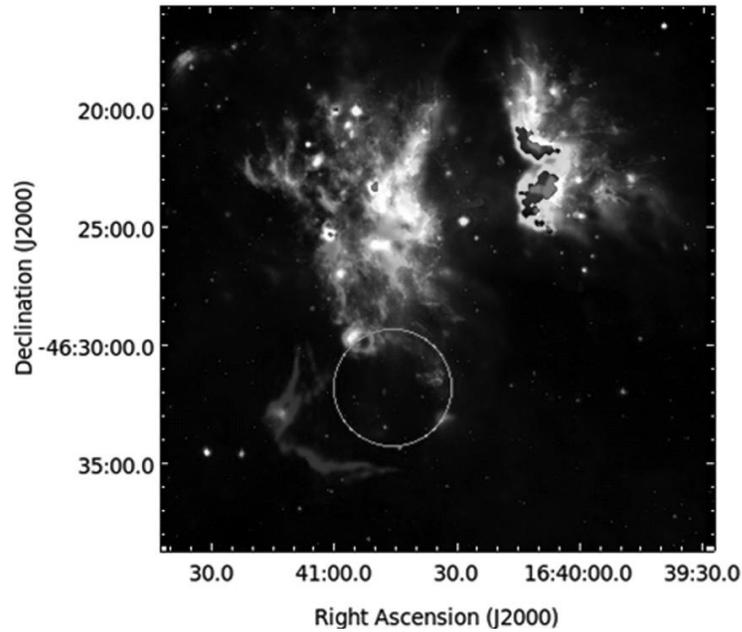


Fig. 1. Una imagen combinada de la emisión en infrarrojo en $8\mu\text{m}$ (verde), $24\mu\text{m}$ (rojo) y continuo de radio en 610 MHz (azul) de la región alrededor del RSN G338.3+0.0. Las zonas blancas muestran la superposición de emisión en ambas bandas del espectro electromagnético. El círculo verde indica el tamaño y posición de la fuente de emisión gamma detectada HESS 1640-465, cuyo origen no ha sido establecido [18].

El advenimiento de nuevas técnicas instrumentales proveerá resultados observacionales de mayor precisión que sin duda iluminarán aquellos aspectos aún poco comprendidos en relación a la producción de partículas altamente energéticas en RSNs.

VI. Resultados Relevantes en al Campo de los RSNs

Del total de los casi 280 RSNs catalogados al presente (ver síntesis en el sitio <http://www.mrao.cam.ac.uk/projects/surveys/snrs/>), existen menos de una decena de fuentes en las cuales se ha detectado emisión sincrotrónica en rayos X. Este tipo de radiación fue observada por vez primera en el RSN histórico SN1006 [21] y posteriormente en las fuentes Cas A [22], RX J1731- 3946 y RX J0852.0-4622, estos últimos detectados también en rayos gamma [23,24,25]. Recientemente, a partir de observaciones realizadas con el telescopio espacial *Chandra* se ha descubierto un curioso patrón de franjas equi-espaciadas en el RSN Tycho, las cuales han sido interpretadas como regiones de compresión magnética y aceleración de partículas [26].

Al presente, han sido observadas aproximadamente 60 fuentes, emitiendo radiación gamma en el rango de energías de los TeV. Sólo en algunos de estos casos se ha determinado con claridad una asociación ya sea con RSNs, con nebulosas de viento creadas por estrellas de neutrones, o con estrellas Wolf Rayet4 (ver síntesis en los sitios <http://tevcat.uchicago.edu> y <http://www.physics.Umanitoba.ca/snr/SNRcat> [27]). Existen también objetos compuestos, caracterizados por la presencia de un pulsar y una cáscara de emisión no térmica en ondas de radio interactuando con nubes moleculares densas del medio interestelar, para los cuales todavía es un interrogante si la emisión a altas energías se debe a la interacción con el gas molecular circundante o a partículas energéticas inyectadas por el pulsar. Por supuesto, no se descarta un escenario híbrido en el cual ambos factores contribuyan independientemente a la

producción de rayos gamma. EL RSN W44 constituye un ejemplo claro de este grupo de fuentes. Este remanente, producto de una explosión de SN ocurrida hace más de 20000 años, evoluciona en el interior de un complejo de nubes moleculares con el cual interactúa y por ello ha adoptado una morfología caracterizada por la presencia de múltiples filamentos. Además, W44 alberga el pulsar PSR B1853+01 en el interior de la cáscara en expansión observada en la emisión sincrotrónica en ondas de radio [28]. En la Fig. 2, se muestra una imagen de este remanente obtenida a partir de observaciones realizadas con el interferómetro Very Large Array en continuo de radio en la frecuencia de 324 MHz. En esta imagen se observa con claridad la estructura filamentaria que posee la cáscara del remanente. Durante varios años se consideró que la emisión gamma en la región de W44, observada por los primeros instrumentos operando en estas energías, tenía su origen en las partículas energéticas provenientes del pulsar [29]. Recientemente, la detección de rayos gamma en el rango de energías desde 50 MeV hasta 10 GeV obtenida con los satélites AGILE y *Fermi*-LAT abrió nuevamente la discusión. Si bien existen ciertas discrepancias en la interpretación detallada que se le ha dado a la emisión detectada por estos instrumentos, en ambos casos se considera que los rayos gamma observados tienen un origen hadrónico debido al decaimiento de piones neutros producidos por protones/iones acelerados que interactúan con el gas circundante [30, 31].

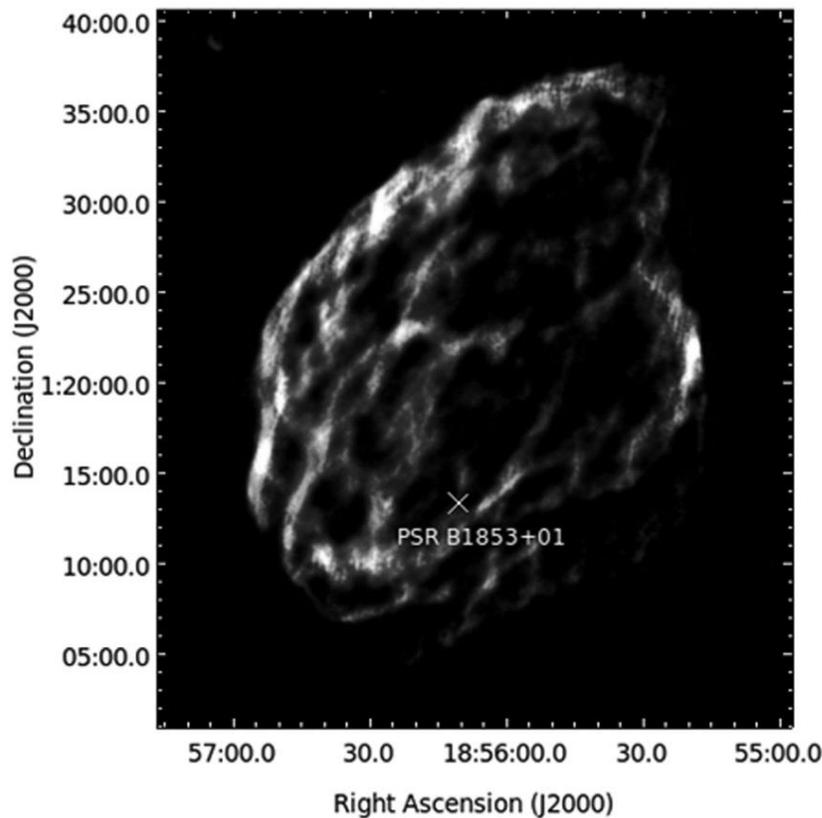


Fig.2. Imagen en continuo de radio del remanente de supernova W44 obtenida a partir de observaciones realizadas con el interferómetro Very Large Array (VLA, USA) operando en 324 MHz [28]. La cruz marca la posición del pulsar PSR B1853+01 creado luego de la explosión de SN. La estructura altamente filamentaria de este objeto es causada por la interacción del frente de choque en expansión con nubes densas de gas molecular circundante.

⁴Las estrellas Wolf-Rayet son objetos evolucionados caracterizados por tener masas entre 20 y 30 veces la masa del Sol y temperaturas superficiales entre 25000 y 50000 K. Estas estrellas sufren grandes pérdidas de masa debido a vientos estelares intensos compuestos por partículas cargadas expulsadas al medio interestelar.

Otro de los RSNs para el cual existe una fuerte evidencia observacional de estar asociado con una fuente de emisión gamma es G353.6- 0.7. En este caso, la emisión a altas energías presenta una morfología tipo cáscara cuya parte más brillante coincide con la emisión, muy débil, detectada en la banda de radio [32]. Este hecho convierte a esta fuente en uno de los pocos RSNs de tipo cáscara con emisión en el rango de los TeV. Por su parte, las observaciones en rayos X, aun cuando cubren sólo una parte de la fuente, dan cuenta de una naturaleza no térmica para esta emisión [33]. Este remanente es uno de los pocos conocidos en nuestra Galaxia que puede considerarse acelerador de rayos cósmicos, y por lo tanto es un objeto fascinante para investigar los procesos de aceleración de partículas en el frente de choque de los restos de supernova.

VII. Conclusiones

El número de asociaciones claramente establecidas entre RSNs y/o nebulosas de viento de pulsares y la emisión a altas energías se ha incrementado notoriamente durante los últimos años a partir de observaciones realizadas en diferentes bandas del espectro electromagnético, en radio con los interferómetros Expanded Very Large Array (EVLA), Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT), etc, en rayos X utilizando los observatorios espaciales *XMM-Newton*, *Chandra* y *Suzaku*, en rayos gamma en diferentes rangos de energía con los instrumentos H.E.S.S, *Fermi-LAT*, VERITAS, AGILE, etc. Es de esperar que con las futuras generaciones de instrumentos incluso los RSNs más débiles asociados con fuentes TeV sean identificados.

En este trabajo han sido presentados algunos de los resultados observacionales más impactantes que favorecen la idea de que los RSNs pueden acelerar en forma eficiente partículas e incluso dar origen a la radiación cósmica de origen galáctico, producida por la inyección de partículas energéticas al medio interestelar. Los modelos teóricos vigentes, por su parte, resultan incompletos, en el sentido que presentan dificultades a la hora de explicar la física de los fenómenos involucrados. Para responder los interrogantes que aún persisten es necesario continuar ampliando la variedad de datos observacionales de alta calidad en diferentes regiones del espectro.

Referencias

- [1] W. Baade & F. Zwicky, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* **20**, 259 (1934).
- [2] B. R. Hanbury, *The Observatory* **74**, 185 (1954).
- [3] A. R. Bell, *MNRAS* **182**, 147 (1978).
- [4] R. Blandford & D. Eichler, *Physics Report* **154**, 1 (1987).
- [5] L. O' C. Drury, *Rep. Prog. Phys.* **46**, 973 (1983).
- [6] F. C. Jones & D. C. Ellison, *Space Sci. Rev.* **58**, 259 (1991).
- [7] M. A. Malkov, *ApJ* **485**, 638 (1997).
- [8] P. Blasi, *Astropart. Phys.* **16**, 429 (2002).
- [9] A. A. Abdo y col., *ApJ* **718**, 348 (2010).
- [10] V. A. Acciari y col., *ApJ* **730**, L 20 (2011).
- [11] F. Giordano y col., *ApJ* **744**, L2 (2012).
- [12] D. Caprioli, *JCAP* **7**, 38 (2012).
- [13] J. Ballet, *Advances in Space Research* **37**, 1902 (2006).

- [14] G. A. Tammann, W. Loeffler & A. Schroeder, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **92** 487 (1994).
- [15] A. M. Hillas, *J. Phys. G, Nucl. Part. Phys.* **31**, 95 (2005).
- [16] D. Caprioli, P. Blasi & E. Amato, *MNRAS* **396**, 2065 (2009).
- [17] D. Caprioli, *JCAP* **5**, 26 (2011).
- [18] A. Lemiere, P. Slane, B. M. Gaensler & S. Murray, *ApJ* **706**, 1269 (2009).
- [19] G. Castelletti, E. Giacani, G. Dubner, B. C. Joshi, A. P. Rao, R. Terrier, *A&A* **536**, A98 (2011).
- [20] S. Gabici, *Memorie della Societa Astronomica Italiana* **82**, 760 (2011).
- [21] K. Koyama, R. Petre, E. V. Gotthelf, U. Hwang, M. Matsuura, M. Ozaki & S. S. Holt, *Nature* **378**, 255 (1995).
- [22] E. V. Gotthelf, B. Koralesky, L. Rudnick, T. W. Jones, U. Hwang & R. Petre, *ApJ* **552**, L39 (2001).
- [23] G. Cassam-Chenai y col., *A&A* **427**, 199 (2004).
- [24] F. A. Aharonian y col., *Nature* **432**, 75 (2004).
- [25] F. A. Aharonian y col., *A&A* **437**, L7 (2005).
- [26] K. A. Eriksen y col., *ApJL* **728**, L28 (2011).
- [27] G. Ferrand & S. Safi-Harb, *Adv. Space Res.* **49**, 1313 (2011).
- [28] G. Castelletti, G. Dubner, C. Brogan & N. E. Kassim, *A&A* **471**, 537 (2007).
- [29] O. C. de Jager & A. Mastichiadis, *ApJ* **482**, 874 (1997).
- [30] A. Giuliani y col., *ApJ* **742**, L30 (2011).
- [31] Y. Uchiyama y col., *ApJ* **749**, L35 (2012).
- [32] W. W. Tian, D. A. Leahy, M. Haverkorn & B. Jiang, *ApJ* **679**, 85 (2008).
- [33] A. Bamba y col., *ApJ*, **756**, 149 (2012).

*Manuscrito recibido el 3 de abril de 2013.
Aceptado el 17 de mayo de 2013*