

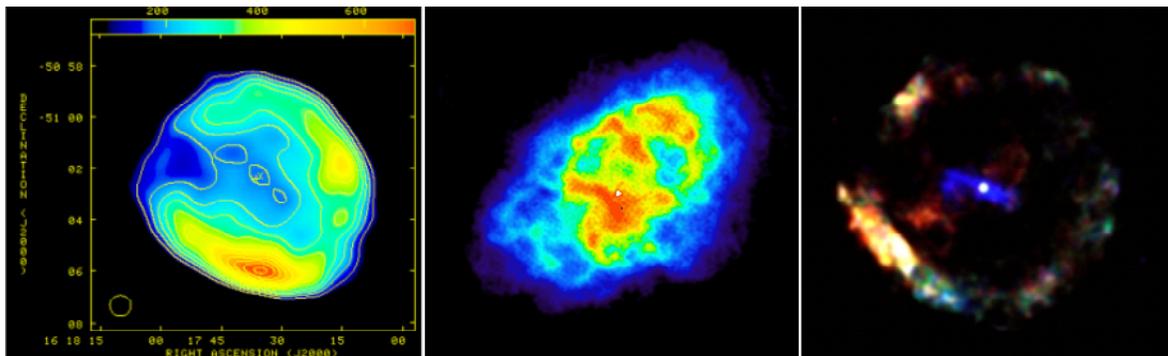
# Remanentes de supernova que brillan en rayos-X

Jorge A. Combi

Los remanentes de supernova (RSN), restos gaseosos de la explosión de una estrella (fenómeno comúnmente conocido como supernova - SN), se forman por la propagación de una onda de choque a través del medio interestelar circundante a donde se produjo dicha explosión.

A las SN se las puede clasificar en dos clases bien diferentes: las SN del tipo I y las SN del tipo II. Cada clase se caracteriza por su historia evolutiva y la masa inicial de la estrella que muere. Las del tipo I se originan por la explosión termonuclear de estrellas con unas pocas masas solares. En cambio las del tipo II, son el resultado del colapso gravitacional de estrellas masivas de varias masas solares. En estas explosiones, se pueden producir destellos de radiación intensísimos a lo largo de todo el espectro electromagnético, que pueden durar desde varias semanas a varios meses. Se caracterizan por un rápido aumento de la intensidad hasta alcanzar un máximo determinado, para luego decrecer en brillo de forma más o menos suave hasta desaparecer completamente.

La onda de choque (o shock) que se propaga a gran velocidad a través del medio, barre y comprime el material interestelar circundante. Por esta razón, los RSN pueden tener una morfología que en general dependerá de las características del medio en el que se encontraba inmersa la estrella que finalmente muere. Si el medio en el que evoluciona es relativamente homogéneo la morfología del RSN será aproximadamente circular (o esférica en 3 dimensiones). En cambio, si el medio circundante es inhomogéneo (existen nubes atómicas o moleculares cercanas) su morfología será en general de forma irregular, con una infinidad de estructuras diferentes. En la Figura 1 podemos observar algunos tipos de RSN con diferente morfología. La imagen de la izquierda es típica de los RSN conocidos como del tipo “cáscara”, los de la imagen central pertenecen a los conocidos como RSN de centro lleno (o del tipo Crab) y los de la imagen de la derecha son del tipo compuesto. O sea, con características de las dos primeras clases.

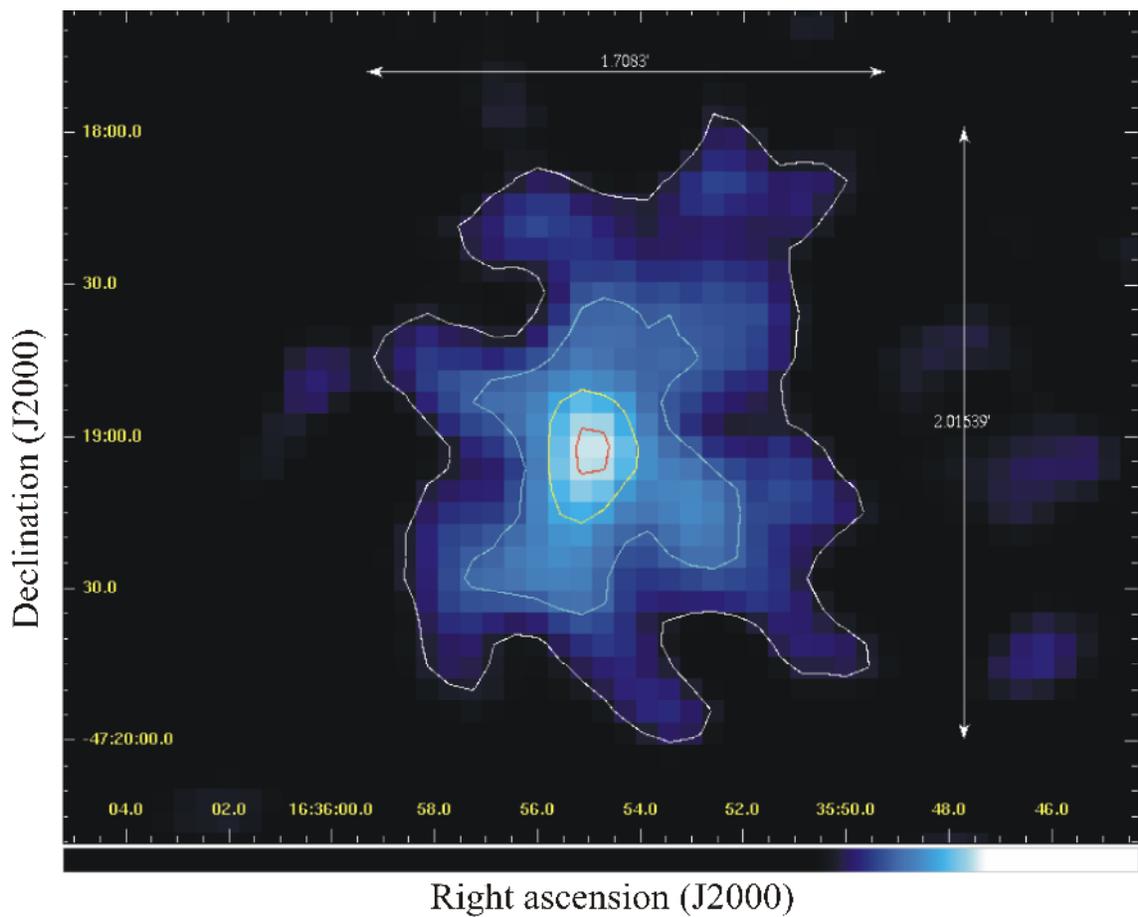


**Fig.1:** Tipos de RSN. La imagen de la derecha es típica de un RSN tipo cáscara. La imagen del centro muestra un RSN del tipo “Crab” o centro lleno. La imagen de la izquierda es una composición de los tipos anteriores.

Los RSN aportan una importante fracción de energía mecánica que calienta, comprime y enriquece químicamente al medio interestelar. Es generalmente aceptado que son sitios de origen, aceleración y propagación de rayos cósmicos, o sea partículas cargadas con energías entre  $10^9$  a  $3 \times 10^{15}$  eV. Por lo tanto, estos verdaderos laboratorios naturales puede servir para investigar las propiedades globales de la galaxia, estudiar la física de partículas y también conocer las características del medio interestelar donde evolucionan.

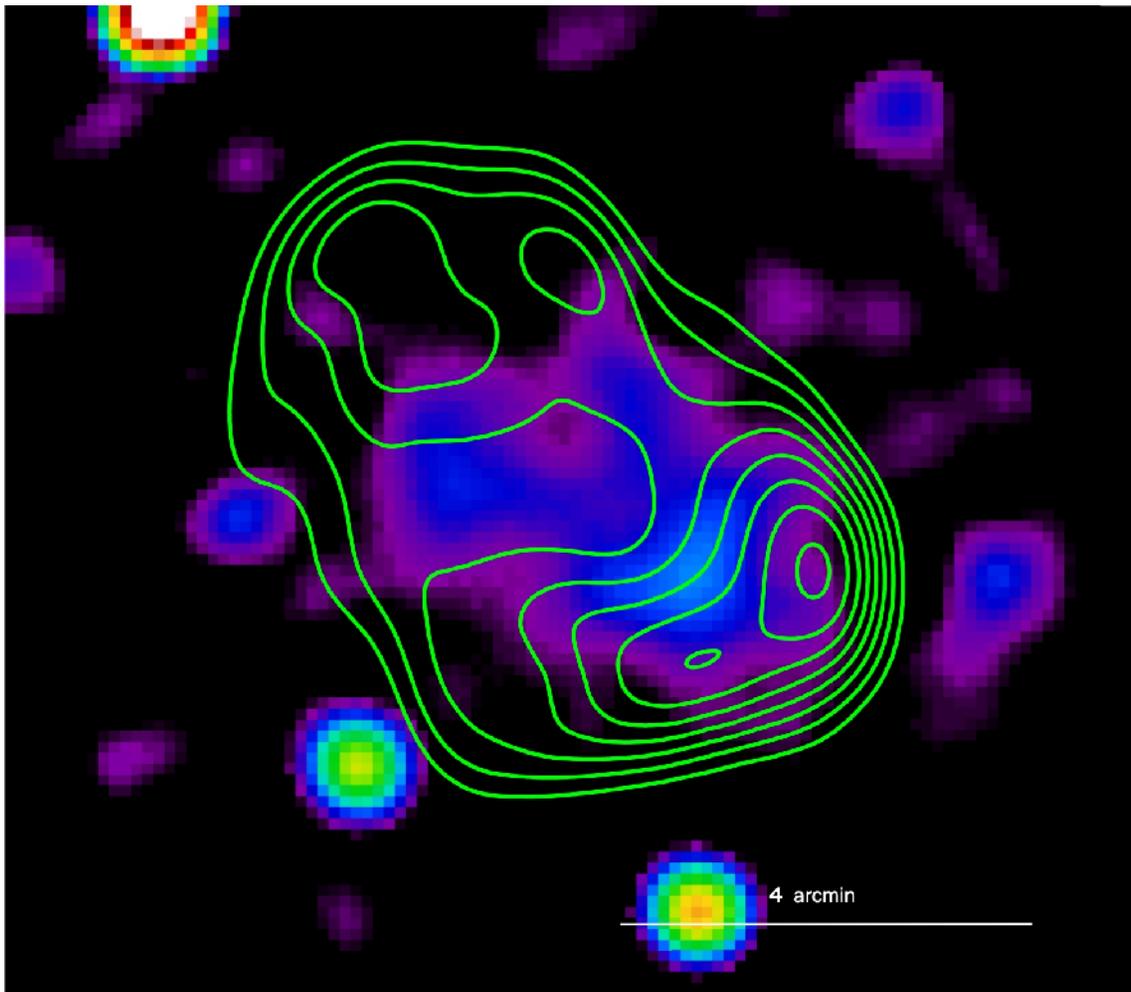
El avance significativo de las capacidades observacionales de los telescopios de rayos-X de última generación, principalmente con respecto a la resolución espacial y espectral, tales como XMM-Newton y Chandra, han permitido realizar un importante progreso en la detección de nuevos y confirmados RSNs. En los últimos 4 años, integrantes del grupo de Astrofísica Relativista y Radioastronomía (GARRA) pertenecientes al Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR), junto con investigadores de la Universidad de Viedma liderado por el Dr. Juan Facundo Albacete Colombo y grupos de la Universidad de Jaén y la Universidad Complutense de Madrid, ha descubierto emisión de rayos-X en al menos cinco RSNs. Cuatro ya habían sido estudiados y clasificados en cierta categoría, gracias a sus propiedades observadas en la banda de radio. El restante fue primero descubierto a frecuencias de radio por nuestro grupo y luego detectado por XMM-Newton en la banda de los rayos-X. Los SNRs estudiados son: G337.2+0.1, G337.8-0.1 (Kes 41), G344.7-0.1, G304.6+0.1 (Kes 17) y G296.8-0.3. A continuación, describiré de manera muy sintética los resultados más importantes de los estudios llevados a cabo en cada uno de los RSN. Para finalmente resaltar las similitudes entre todos ellos.

El objeto **G337.2+0.1** fue detectado en la banda de radio a 843 MHz por el Molonglo Observatory Synthesis Telescope (MOST - Whiteoak & Green 1996), y sugerido como RSN en base a sus propiedades estudiadas con la línea de 21 cm y el continuo de radio (Combi et al. 2005). Un año después fue detectado por XMM en la banda de los rayos-X. Teniendo en cuenta sus características en radio, como así también sus propiedades en rayos-X descubrimos que el objeto es un RSN del tipo “Crab”, o sea, con emisión X originada por electrones relativistas que dan origen a una estructura conocida como “pulsar wind nebula” (PWN). Una especie de nebulosa de naturaleza no térmica producida por un púlsar (una estrella de neutrones en rotación). La Figura 2 muestra una imagen (en falso color) del RSNs en el rango de energía de rayos-X entre 0.5-10.0 keV. El objeto muestra emisión X difusa con un máximo en la región central que disminuye hacia el borde externo. El análisis espectral confirma que la densidad columnar es alta ( $N_H \sim 6 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ) y su espectro se ajusta a una ley de potencia con índice fotónico  $\Gamma = 1$ .



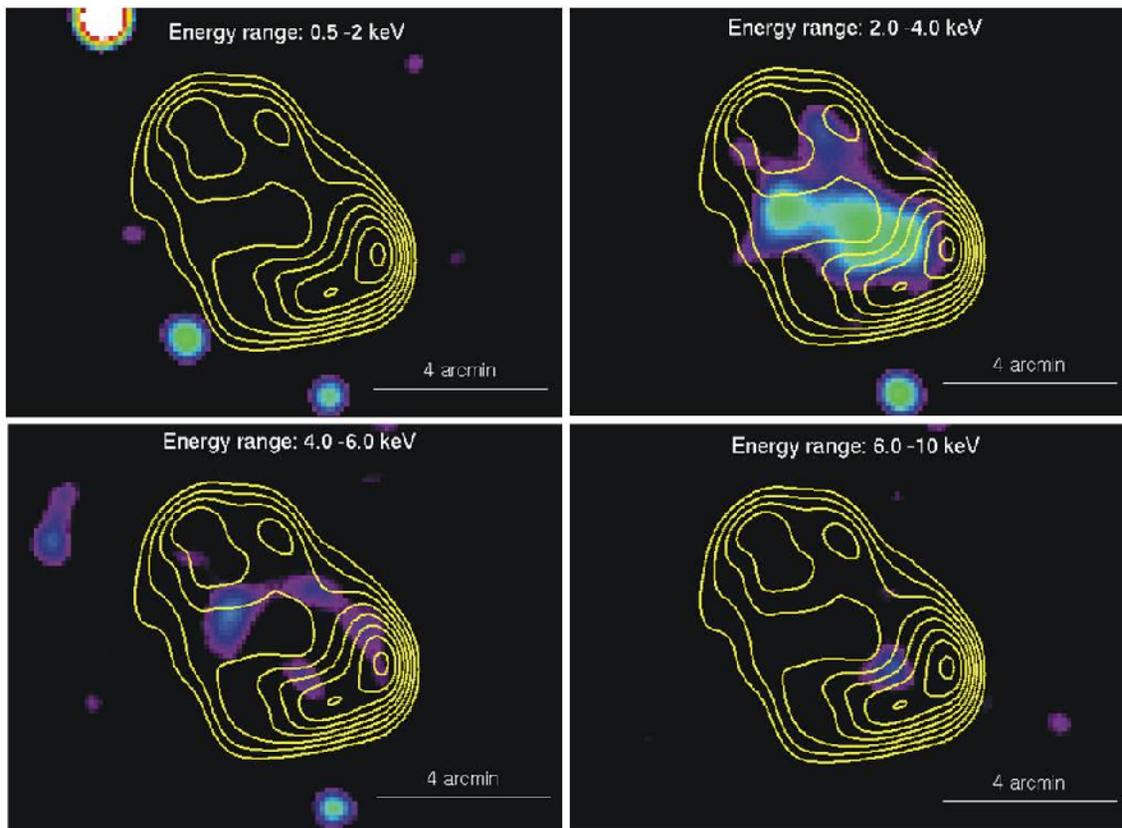
**Fig.2:** Imagen de G337.2+0.1 en rayos-X y en la banda de los 0.5 a 10.0 keV.

El RSN **G337.8-0.1** fue detectado por *XMM-Newton* a fines de 2007. La excelente calidad de las observaciones permitió estudiar la morfología del objeto en diferentes rangos de energía, analizar sus propiedades espectrales y su posible comportamiento variable. La Figura 3 muestra una imagen (en falso color) del objeto en el rango de energía de rayos-X entre 0.5-10.0 keV, con los contornos de radio en color verde superpuestos. Como puede observarse la emisión-X es difusa con estructura de centro lleno y ausencia de objeto compacto en su interior.



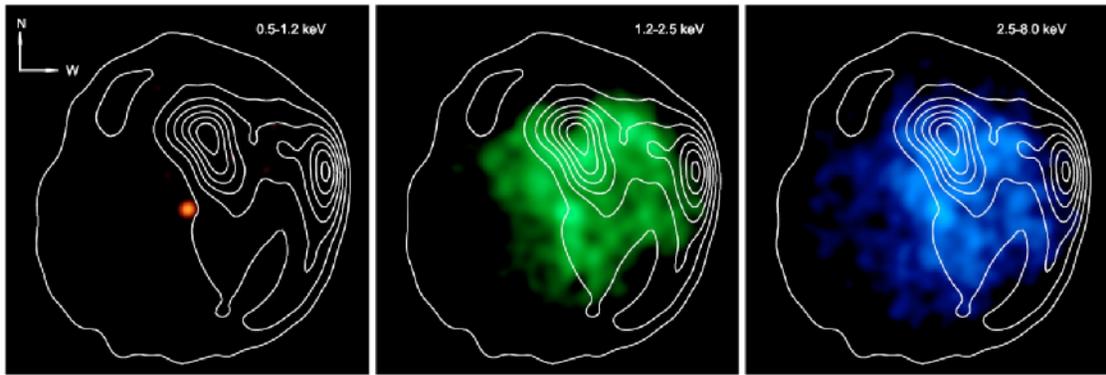
**Fig.3:** Imagen de G337.8-0.1 en la banda de los 0.5 a 10.0 keV.

La Figura 4 muestra al RSN en 4 rangos de energía diferentes. Como puede verse la emisión más intensa se encuentra entre 2 y 4 keV. Una región de los rayos-X conocida como “media”. El análisis espectral muestra que la densidad de la columna de hidrógeno es alta ( $N_H > 6.9 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ) lo cual confirma que el objeto se encuentra a gran distancia del sol, posiblemente más allá de los 7 kpc. Además el espectro de rayos-X exhibe líneas de emisión, indicando que la emisión de rayos-X es de origen térmico. Este espectro se ajusta a un modelo en el cual el plasma no se encuentra en equilibrio de ionización. Teniendo en cuenta las características en rayos-X y sus parámetros físicos en la banda de radio, hemos concluido que el objeto pertenece a la clase de RSN con morfología mixta (conocidos como MM). O sea, RSNs que tienen emisión de radio en los bordes (o sea, las regiones externas) y presentan emisión de rayos-X con centro lleno.



**Fig.4:** Imagen de G337.8-0.1 en 4 bandas de energía 0.5-2, 2-4, 4-6 y 6-10.0 keV.

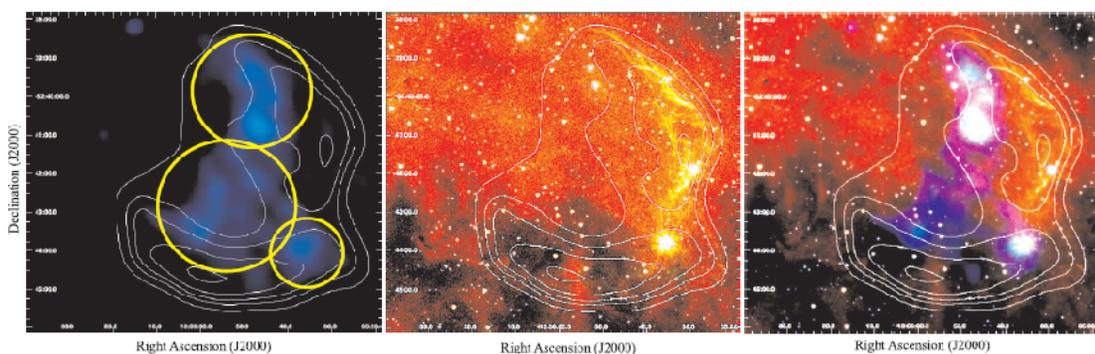
El RSN **G344.7-0.1** fue descubierto por Caswell et al. (1975) a 408 MHz y 5000 MHz usando los radiotelescopios MOST y Parkes, respectivamente. Observaciones de radio de alta resolución espacial (Dubner et al. 1993) permitieron clasificar al objeto como posible RSN del tipo compuesto. Estas observaciones revelaron que el RSN tiene una clara morfología asimétrica y pertenecería a los RSN del tipo capa (o shell). Su emisión de radio es de origen no térmico y la distancia es aún incierta. Usando base de datos obtenidos con los telescopios de rayos-X XMM-Newton y Chandra, y el telescopio Spitzer que opera en el rango del infrarrojo, hemos detectado y estudiado en detalle la emisión infrarroja y de rayos-X en G344.7-0.1. Además, hemos descubierto que en el centro geométrico de su radio estructura existe un objeto compacto, el cual fue estudiado en detalle. Este objeto tiene todas las características típicas de los objetos llamados Objetos Compactos Centrales (Compact Central Objects -CCO). La Figura 5 muestra 3 imágenes Chandra del RSN en 3 bandas de energía. Es importante notar en la primera imagen como se resalta la presencia del objeto central.



**Fig.5:** La figura muestra 3 imágenes de G344.7-0.1 obtenidas con el telescopio Chandra en el rango de energía de 0.5-1.2 (izquierda), 1.2'-2.5 (centro) y 2.5-8.0 keV (derecha).

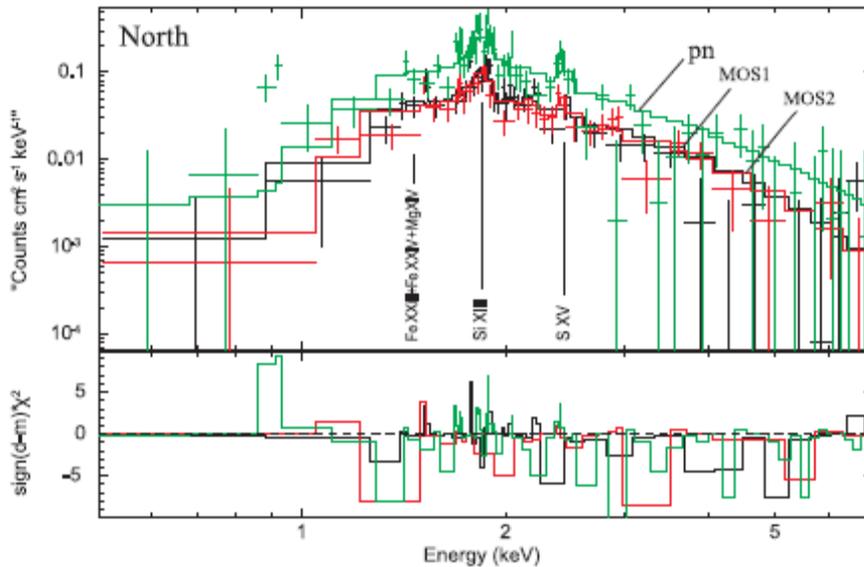
Desgraciadamente la asociación del objeto central que se observa en la primera imagen no pudo ser confirmada con el SNR pues la densidad de la columna de hidrógeno (NH) del objeto no se corresponde con el valor de NH obtenido para el RSN. Por lo tanto, la fuente de rayos-X central podría ser una estrella de campo o el RSN estar en una región donde existen gran cantidad de nubes moleculares. Si finalmente esta asociación se confirma este objeto sería octavo CCO descubierto y el más lejano por primera vez detectado.

En el estudio realizado sobre el RSN **G304.6+0.1** (Kes 17) se llevo a cabo un análisis detallado de las propiedades espaciales y espectrales del objeto, usando datos del observatorio XMM-Newton. La Figura 6 muestra la correlación entre la emisión en radio, infrarojo y de rayos-X en Kes 17. El RSN muestra estructura extendida con filamentos en la parte externa sin objeto central en su parte interna. La emisión infrarojo (que se muestra en color naranja) se correlacionan muy bien con regiones de radio emisión hacia la parte derecha del objeto.



**Fig.6:** La figura muestra 3 imágenes de G304.6+0.1. La imagen de la izquierda muestra la emisión en rayos-X obtenidas con el telescopio XMM (en azul) en el rango de energía de 0.5-8.0 keV con los contornos de radio superpuestos en color blanco. Los círculos amarillos muestran las regiones de extracción de los espectros. La imagen central muestra una imagen obtenida con el telescopio Spitzer en la bande del infrarojo (3.6, 4.5, 5.8 micrones) y la imagen de la derecha muestra la correlación entre la emisión en radio, infrarojo y rayos-X.

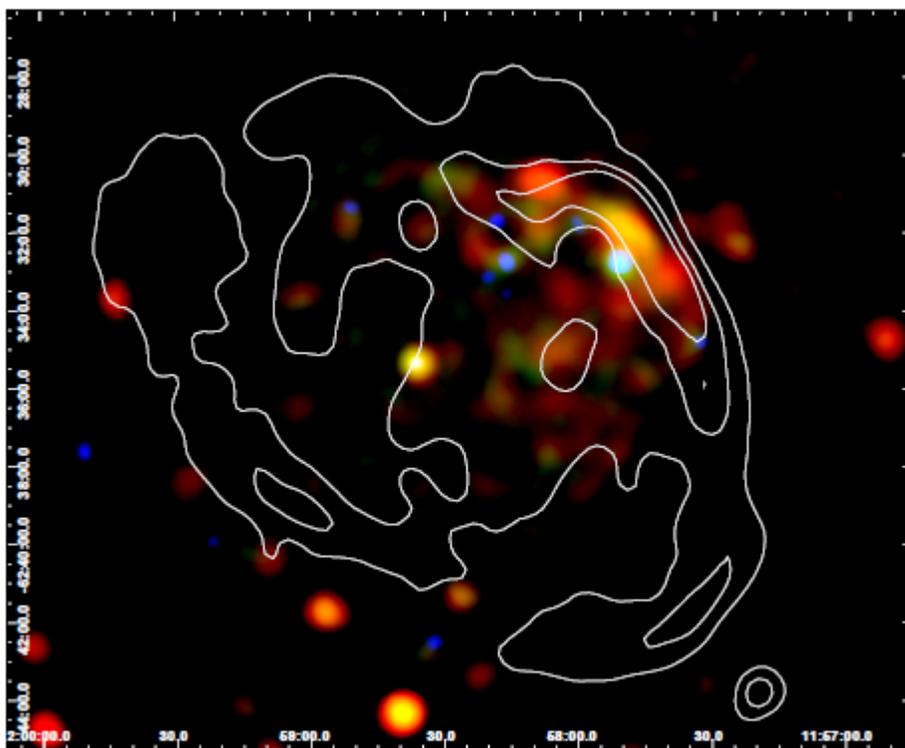
El análisis espectral permite inferir que la densidad de la columna de hidrógeno es alta ( $NH > 3 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ) lo cual confirma que el objeto se encuentra a gran distancia del sol, posiblemente más allá de los 10 kpc. Además, su espectro presenta líneas de emisión confirmando que la radiación X es de origen térmico. La figura 7 muestra el espectro de la región norte.



**Fig.7:** Espectro de rayos-X obtenido con XMM de Kes 17. La línea sólida indica el mejor ajuste obtenido para un modelo de tipo NEI (o sea un plasma que no se encuentra en equilibrio de ionización) . Las líneas más intensas se observan a 1.8 y 2.4 que corresponden a los elementos Si XIII (silicio) y S XV (azufre). Los diferentes colores pertenecen a los 3 detectores (o cámaras) de XMM.

Las características obtenidas en diferentes partes del espectro permiten inferir que el RSN tiene una edad en el rango de  $(2.8-6.4) \times 10^4$  años y pertenece a los RSN con morfología mixta

La investigación que se llevo a cabo sobre **G296.8-0.3** mostró también importantes resultados. Este trabajo está en progreso y a punto de ser enviado a publicación. En el contexto de un estudio multi-longitud de onda se estudiaron las correlaciones entre las características de objeto observadas a frecuencias de radio, infrarrojo y en rayos-X. Esto ha permitido obtener un posible escenario evolutivo del objeto y estudiar su inusual morfología a frecuencias de radio. La figura 8 muestra una imagen del RSN en la banda de los 0.4-4.0 keV.



**Fig.8:** La imagen muestra al RSN G296.8-0.3, en el rango de energía de 0.4-4.0 keV con los contornos de radio superpuestos en color blanco. Las fuentes puntuales que se observan en azul son posiblemente fuentes extragalácticas, que brillan en la parte dura de los rayos-X (o sea, a energías por encima de los 2.5 keV).

Como puede verse la emisión X se correlaciona con la región norte del RSN demostrando que en esa región la densidad de materia es relativamente más alta que la parte sur. El análisis espectral en la banda de los rayos-X muestra que la emisión tiene una fuerte componente térmica (existen líneas de emisión en el espectro) con una posible componente no térmica aportada por las fuentes extragalácticas que se ve en azul. Otro aspecto importante de este estudio es el descubrimiento de una fuente compacta casi centrada en la estructura de radio (mostrada en contornos blancos). Los análisis de esta fuente permiten inferir que podría ser un CCO pero la baja estadística de la observación (o sea, la poca cantidad de fotones X acumulados para esta fuente) no permite hacer un estudio muy confiable de su origen.

En resumen, en este pequeño artículo he descripto de manera sintética los principales resultados obtenidos en el estudio de 5 RSN estudiados con los telescopios de rayos-X, XMM y Chandra. El primero de ellos es originado por una PWN y es por lo tanto de naturaleza no térmica. Otros tres presentan emisión X de origen térmica y pertenecen a la subclase de RSN con morfología mixta. En particular uno de ellos contiene un posible objeto compacto central. Finalmente el último caso es bastante inusual ya que no parece ser parte de una clase bien definida de RSN y además contiene un objeto compacto central en su interior.

Como comentario final quisiera destacar que la posibilidad de estudiar objetos de este tipo (como así también estrellas, sistemas binarios, regiones de formación estelar, galaxias o cúmulos de galaxias, entre otros objetos) con la nueva generación de observatorios orbitales, abre grandes posibilidades de investigación en un campo de la

astronomía que se conecta de manera natural con otras partes del espectro electromagnético. Este tipo de información, que se encuentran al alcance de toda la comunidad científica internacional, está esperando ser aprovechada por investigadores con curiosidad, talento, motivación, coraje intelectual, disciplina, tesón, laboriosidad, integridad y disposición a cooperar.