



# Búsqueda de asociaciones entre candidatos a remanente de supernova y púlsares

A. Petriella<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina

Contacto / apetriella@iafe.uba.ar

**Resumen** / El número de remanentes de supernova en la Galaxia es un tercio del total esperado. Se ha sugerido que esto podría deberse a que no se detectan los remanentes más evolucionados, es decir, los menos brillantes en radio. Recientemente, el relevamiento GLOSTAR ha reportado 157 candidatos a remanente en el primer cuadrante Galáctico. En este trabajo, se estudia la asociación de estos candidatos con púlsares, con el objetivo de establecer su distancia. En base a criterios de posición, edad y velocidad de los púlsares, se hallaron 7 asociaciones. Se discuten métodos alternativos para estimar la distancia a los remanentes candidatos.

**Abstract** / The number of supernova remnants in the Galaxy is about one third of the expected number, probably due to underdetection of the most evolved sources, which are expected to be dimmer in the radio band. Recently, the GLOSTAR surveys has reported 157 supernova remnant candidates in the first Galactic quadrant. We study the association between these candidates and pulsars, with the purpose of determining their distance. Based on pulsar's position, age and velocity, we found 7 possible associations. We discuss alternative methods to derive the distance of the remnant candidates.

**Keywords** / ISM: supernova remnants — pulsars: general — radio continuum: ISM — ISM: general

## 1. Introducción

Existen en la Galaxia casi 300 remanentes de supernova (RSNs) confirmados, en su mayoría de tipo cáscara o compuesto (Green, 2019), aunque el número esperado es de aproximadamente 1000 (ver referencias en Dokara et al. 2021). Esta subdetección suele atribuirse a limitaciones en resolución angular y/o sensibilidad de los actuales radiotelescopios. Teniendo en cuenta que el brillo superficial en radio de los RSNs disminuye a medida que se expanden en el medio interestelar (MIE), se ha sugerido que los remanentes “faltantes” podrían ser o muy jóvenes (y, por lo tanto, muy compactos) o muy evolucionados (y, por lo tanto, poco brillantes) (Dubner & Giacani, 2015).

Parte de los RSNs “faltantes” podrían encontrarse dentro de la población de remanentes candidatos (cRSNs), la cual está formada por un gran número de cáscaras detectadas en la banda de radio con indicios de emisión no térmica, pero que aún no poseen estudios polarimétricos o espectrales que permitan confirmarlos como RSNs. Por ejemplo, utilizando observaciones preliminares en 5.8 GHz del relevamiento Global View on Star Formation in the Milky Way (GLOSTAR), Dokara et al. (2021) reportan 157 cRSNs en el rango de longitudes Galácticas  $0^\circ < l < 60^\circ$ , incluyendo candidatos identificados en relevamientos previos en radio y nuevos candidatos a partir de las nuevas observaciones de GLOSTAR. Como es de esperar, estos cRSNs son en general más pequeños y menos brillantes que la población de remanentes confirmados.

El estudio del estado evolutivo de la población de cRSNs podría servir para determinar si son efectivamen-

te remanentes más evolucionados que aquellos confirmados, lo cual podría explicar el menor brillo superficial. Teniendo en cuenta que es esperable que un RSN permanezca detectable en radio durante la etapa adiabática (Pavlović et al., 2018), conocer el estado evolutivo de los cRSNs permitiría inferir si están llegando al final de la misma o si ya han avanzado a la etapa radiativa. La edad desde la explosión de un RSN puede inferirse a partir del tamaño del mismo y la densidad del medio, utilizando un modelo sencillo de evolución (ver la Sección 4 de Vink 2012). Por lo tanto, resulta fundamental conocer la distancia a la que se encuentra el remanente. Existen diversos métodos para conocer la distancia a un RSN, entre los que se puede mencionar la histórica “relación  $\Sigma_\nu - D$ ”, el método cinemático, o la asociación con fuentes del MIE (nubes, cáscaras o cavidades de gas neutro y/o molecular) o con púlsares (PSRs) (ver Dubner & Giacani 2015 para una revisión crítica de estos métodos).

En este trabajo se presentan los resultados de la búsqueda de asociaciones entre cRSNs del relevamiento GLOSTAR y PSRs. En la Sección 2 se presenta una caracterización de las asociaciones entre RSNs confirmados y PSRs en nuestra Galaxia, con el objetivo de acotar los parámetros de búsqueda de asociaciones con los remanentes candidatos. Los resultados de la búsqueda de asociaciones cRSN-PSR se presentan en la Sección 3.

## 2. Metodología y datos

El principal criterio para establecer la asociación entre un RSN y un PSR es la coincidencia posicional, aunque

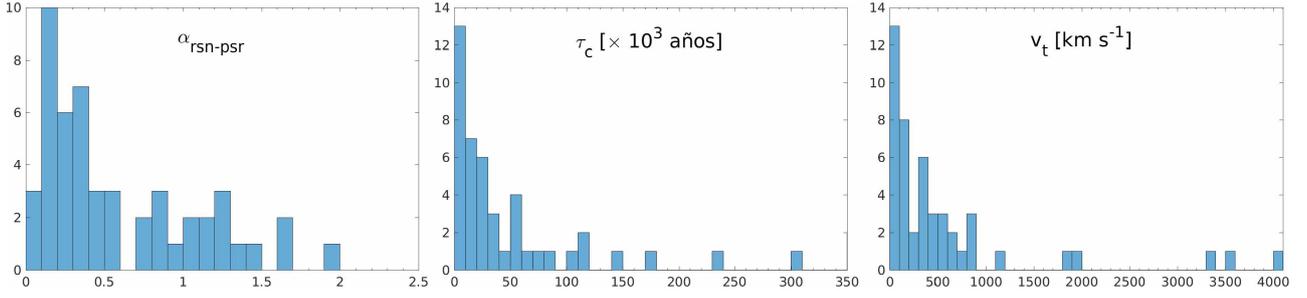


Figura 1: Distribución de parámetros de las asociaciones RSN-PSR propuestas en la literatura. *Panel izquierdo*: distancia entre el PSR y el centro del RSN en función del radio del RSN para las 50 asociaciones. *Panel central*: edad característica de los 47 PSRs con medición de  $\tau_c$ . Para una mejor visualización, se excluyen los PSRs más viejos (PSR J0538+2817, PSR J1852+0040 y PSR J1210–5226). *Panel derecho*: velocidad transversal  $v_t$  para los 47 PSRs con medición de  $\tau_c$ .

esto no limita la búsqueda dentro de la cáscara del remanente debido a dos motivos. Por un lado, la mayoría de los RSN poseen en la banda de radio morfologías distorsionadas que se apartan de la forma de cáscara circular. Por otro lado, debido a la velocidad que adquiere el pulsar en su nacimiento (llamada usualmente “velocidad de patada”), es posible que al cabo de algunos miles de años sobrepase la cáscara del RSN (van der Swaluw et al., 2004). Además de la posición, existen restricciones en la edad y velocidad del PSR asociado. Teniendo en cuenta que un RSN permanece detectable en radio por  $\lesssim 10^5$  años, es esperable la asociación con PSRs jóvenes. Respecto de la velocidad, es esperable que la velocidad del PSR no supere las velocidades de patada típicas de PSRs en nuestra Galaxia, es decir, algunos  $100 \text{ km s}^{-1}$  y hasta  $1000 \text{ km s}^{-1}$  en los casos extremos (Igoshev, 2020). Para RSNs que posean alguna estimación independiente de distancia y/o edad, podemos considerar la asociación con un PSR como confiable si existe coincidencia entre las distancias y/o edades de ambos objetos o si el movimiento propio del PSR indica que pudo haber nacido en el centro del remanente (Kaspi, 1998). El resto de las asociaciones deberán ser consideradas como posibles dado que sólo se dispone de una coincidencia posicional.

## 2.1. Asociaciones entre RSNs y PSRs en la Galaxia

Se realizó una búsqueda bibliográfica de las asociaciones entre RSNs de tipo cáscara o compuesto y PSRs en nuestra Galaxia a partir de los catálogos SNRcat\* y el catálogo de Green (2019). La posición y radio de los RSNs se obtuvieron de este último y los parámetros de los PSRs (posición, edad característica  $\tau_c$  y distancia  $d$ ) del ATNF Pulsar Catalog (Manchester et al., 2005). Para la distancia al PSR se considera la obtenida a partir de la medida de dispersión, o en ausencia de esta última, se usa la distancia alternativa reportada en el catálogo. Se estimó la separación RSN-PSR en función del radio angular del remanente  $R_{\text{RSN}}$  a partir de la relación  $\alpha_{\text{RSN-PSR}} = \Theta_{\text{RSN-PSR}}/R_{\text{RSN}}$ , donde  $\Theta_{\text{RSN-PSR}}$  es la separación angular entre el PSR y el centro del RSN. Se estimó la velocidad transversal  $v_t = \Theta_{\text{RSN-PSR}} d \tau_c^{-1}$ . Esta velocidad es una cota inferior a la velocidad 3D del

PSR.

Se hallaron 50 asociaciones sugeridas en la literatura\*\*. En la Fig. 1, se muestra la distribución de  $\alpha_{\text{RSN-PSR}}$ ,  $\tau_c$ , y  $v_t$ . En la mayoría de las asociaciones propuestas, el PSR se encuentra “dentro” de la cáscara ( $\alpha_{\text{RSN-PSR}} < 1$ ), pero hay varias asociaciones con PSRs hasta 1.5 veces el radio del remanente. Como es esperable, la mayoría de los PSRs asociados son jóvenes ( $< 100 \text{ kyr}$ ), aunque hay varias asociaciones con PSRs de edad intermedia (de algunos cientos de kyr) o viejos. Se destacan los casos extremos de PSR J0538+2817 ( $\sim 0.6 \text{ Myr}$ ), PSR J1852+0040 ( $\sim 1.9 \text{ Myr}$ ) y PSR J1210–5226 ( $\sim 3.0 \text{ Myr}$ ), excluidos del panel central de la Fig. 1. En particular, los últimos dos tienen edades características que superan en órdenes de magnitud las edades de Kes 79 y G296.5+10.0, sus respectivos remanentes asociados, por lo que se ha puesto en duda que  $\tau_c$  represente la edad real de estos dos PSRs (Halpern et al., 2007; Halpern & Gotthelf, 2010). Respecto de las velocidades transversales, la gran mayoría de los PSRs asociados tienen  $v_t$  de algunos cientos de  $\text{km s}^{-1}$ , aunque se destacan varios PSRs extremadamente rápidos ( $v_t > 3000 \text{ km s}^{-1}$ ). Para una discusión crítica de estas asociaciones ver Gvaramadze (2001), Supan et al. (2016) y Göğüş et al. (2010).

\*\*Asociaciones RSN / PSR ( $\dagger$  indica los PSRs sin  $\tau_c$ ): 0.9+0.1/1747–2809, 11.1+0.1/1809–1917, 11.2–0.3/1811–1925, 12.8–0.0/1813–1749, 21.5–0.9/1833–1034, 23.3–0.3/1834–0845, 27.4+0.0/1841–0456, 29.6+0.1/1844–0256 $\dagger$ , 29.7–0.3/1846–0258, 33.6+0.1/1852+0040, 34.7–0.4/1856+0113, 40.5–0.5/1907+0631, 42.8+0.6/1907+0918, 54.1+0.3/1930+1852, 54.4–0.3/1932+1916, 57.2+0.8/1935+2154 $\dagger$ , 65.1+0.6/1954+2836, 65.3+5.7/1931+30 $\dagger$ , 69.0+2.7/1952+3252, 76.9+1.0/2022+3842, 78.2+2.1/2021+4026, 109.1–1.0/2301+5852, 114.3+0.3/2337+6151, 116.9+0.2/0002+6216, 119.5+10.2/0007+ 7303, 160.9+2.6/0501+4516, 179.0+2.6/0554+3107, 180.0–1.7/0538+2817, 263.9–3.3/0835–4510, 266.2 –1.2/0855–4644, 284.3–1.8/1016–5857, 290.1–0.8/1101–6101, 292.0+1.8/1124–5916, 292.2–0.5/1119–6127, 293.8+0.6/1135–6055, 296.5+10.0/1210–5226, 308.8 –0.1/1341–6220, 310.6–0.1.6/1400–6325, 312.4–0.4/1412–6145, 315.9–0.0/1437–5959, 320.4–1.2/1513 –5908, 321.9–0.3/1522–5735, 327.2–0.1/1550–5418, 338.3–0.0 / 1640–4631, 341.2+0.9/1646–4346, 343.0–6.0/1731–4744, 343.1–2.3/1709–4429, 351.7+0.8/1721 –3532, 354.1+0.1/1730–3350, 359.1–0.5/1747–2958.

\*Ferrand & Safi-Harb (2012), disponible en <http://www.physics.umanitoba.ca/snr/SNRcat>

### 3. Resultados

Para la búsqueda de coincidencias posicionales, se construyó un mapa con la distribución de los cRSNs y PSRs. La posición y el radio de los candidatos se obtuvieron de Dokara et al. (2021) (Tabla 3 y 4), mientras que la posición de los PSRs del ATNF Pulsar Catalog. Teniendo en cuenta los resultados de la Sección 2.1, se definió un radio de búsqueda igual a 1.5 veces en radio del cRSN. En la Fig. 2 se muestra a modo de ejemplo uno de los mapas utilizados.

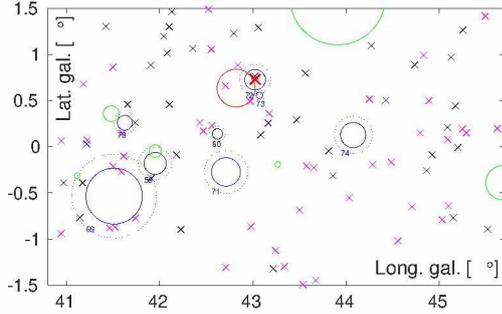


Figura 2: Ejemplo de mapa utilizado para búsqueda de coincidencia posicional entre cRSNs y PSRs, en coordenadas Galácticas. Las cruces representan las posiciones de los PSR con  $\tau_c < 100$  kyr (azul),  $\tau_c > 100$  kyr (magenta), y sin edad reportada (negro). Los círculos azules (línea llena) son los cRSN y la línea punteada indica 1.5 veces su radio. Los círculos rojos son los RSNs confirmados del catálogo de Green (2019) que poseen un PSR asociado (el cual se indica con una cruz roja). Los círculos verde son los RSNs confirmados sin PSR asociado.

Se hallaron 38 cRSNs superpuestos con al menos un PSR hasta 1.5 veces el radio del remanente. Entre ellos, 11 cRSNs superpuestos a al menos un PSR joven ( $\tau_c < 100$  kyr), 26 cRSNs a algún PSR de edad intermedia o viejo, y 16 cRSNs a algún PSR sin edad reportada. En la Tabla 1 se muestran las 11 asociaciones entre cRSNs y PSRs jóvenes. En base a la velocidad transversal, dos asociaciones podrían descartarse por corresponder a PSRs extremadamente rápidos ( $v_t > 2000$  km s $^{-1}$ ).

### 4. Discusión

La asociación entre cRSNs y PSRs resulta un método limitado para establecer distancias debido al bajo número de asociaciones halladas. Como próximo paso, se usará otro método para estimar la distancia a un número mayor de candidatos y que permita confirmar las asociaciones halladas, incluso con los PSRs viejos o sin edad.

El método cinemático para acotar distancias se basa en la absorción que produce una fuente de continuo de radio de la radiación del fondo de HI, aunque no resultaría un método útil debido a que las fuentes de radiocontinuo poco intensas suelen producir espectros de absorción de HI por demás ruidosos (Ranasinghe & Leahy, 2018). Alternativamente, la “relación  $\Sigma_\nu - D$ ” entre el brillo superficial en radio y el diámetro del re-

manente podría aplicarse ya que el catálogo de Dokara Tabla 1: Asociaciones entre cRSNs y PSRs jóvenes.  $v_t$  se calculó para los PSRs con distancia reportada en el ATNF Pulsar Catalog.

cRSN	PSR	$\tau_c$ [kyr]	$v_t$ [km s $^{-1}$ ]
G005.364−0.705	J1801−2451	15	870
G041.510−0.534	J1909+0749	25	2500
G043.023+0.726	J1907+0919	0.9	-
	J1907+0918	38	15
G8.8583−0.2583	J1806−2125	65	67
G18.45−0.42	J1826−1256	14	203
G23.11+0.19	J1833−0831	35	-
G26.13+0.13	J1837−0604	34	523
G26.53+0.07	J1838−0537	5	-
G41.95−0.18	J1909+0749	25	943
G53.84−0.75	J1931+1817	35	2150
G54.11+0.25	J1930+1852	3	746

et al. (2021) reporta los valores de  $\Sigma_\nu$ , a partir de los cuales puede obtenerse el diámetro  $D$  esperado. Con esto último, utilizando el diámetro angular del cRSN, puede obtenerse su distancia. Cabe mencionar que los flujos de los cRSNs fueron obtenidos solo a partir de los datos del VLA y cuentan con pérdida de flujo propia de la técnica interferométrica. En un futuro próximo, cuando se agreguen las observaciones de disco simple al relevamiento GLOSTAR, se contará con una mejor medición de  $\Sigma_\nu$ . Más allá de esto, este método posee incertezas en las distancias que pueden llegar hasta el 50 % (Pavlović et al., 2018).

En base a las limitaciones de los métodos mencionados, se comenzará con la búsqueda de posibles asociaciones con el gas molecular y/o neutro, aprovechando la amplia disponibilidad de datos públicos en el primer cuadrante de la Galaxia, tanto de CO (por ejemplo, el Galactic Ring Survey o el FOREST Unbiased Galactic plane Imaging survey) como de HI (VLA Galactic Plane Survey). Cabe mencionar que este método posee errores inherentes que pueden llegar al 30 % y existe ambigüedad de distancia para las fuentes dentro del círculo solar (Dubner & Giacani, 2015).

### Referencias

- Dokara R., et al., 2021, A&A, 651, A86  
 Dubner G., Giacani E., 2015, A&A Rv, 23, 3  
 Ferrand G., Safi-Harb S., 2012, Adv. Space Res., 49, 1313  
 Göğüş E., et al., 2010, ApJ, 722, 899  
 Green D.A., 2019, JApA, 40, 36  
 Gvaramadze V.V., 2001, A&A, 374, 259  
 Halpern J.P., Gotthelf E.V., 2010, ApJ, 709, 436  
 Halpern J.P., et al., 2007, ApJ, 665, 1304  
 Igoshev A.P., 2020, MNRAS, 494, 3663  
 Kaspi V.M., 1998, Adv. Space Res., 21, 167  
 Manchester R.N., et al., 2005, AJ, 129, 1993  
 Pavlović M.Z., et al., 2018, ApJ, 852, 84  
 Ranasinghe S., Leahy D.A., 2018, AJ, 155, 204  
 Supan L., Supanitsky A.D., Castelletti G., 2016, A&A, 589, A51  
 van der Swaluw E., Downes T.P., Keegan R., 2004, A&A, 420, 937  
 Vink J., 2012, A&A Rv, 20, 49