

## COMUNICACIÓN DE TRABAJO – CONTRIBUTED PAPER

### El estado evolutivo de la enana blanca en el pulsar binario PSR J1713+0747

Omar Gustavo Benvenuto

*Pontificia Universidad Católica, Santiago, Chile. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC), Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas UNLP (FCAGLP), Argentina, obenvenu@astro.puc.cl; obenvenuto@fcaglp.unlp.edu.ar*

René Daniel Rohrmann

*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina, rohr@oac.uncor.edu*

María Alejandra De Vito

*CIC, Universidad Nacional de La Plata, Instituto de Astrofísica de La Plata (IALP), Argentina, adevito@fcaglp.unlp.edu.ar*

**Abstract.** Recently, Splaver and coworkers have measured the masses of the white dwarf and the neutron star components of the PSR J1713+0747 binary system pair by means of the general relativistic effect known as Shapiro Delay with very high accuracy. Employing this data we attempt to find the original configuration that evolved to the observed system. For this purpose we perform a set of binary evolution calculations trying to simultaneously account for the masses of both stars and the orbital period.

**Resumen.** Recientemente, Splaver y colaboradores han medido con gran precisión las masas de la enana blanca y de la estrella de neutrones componentes del sistema binario PSR J1713+0747 mediante el efecto relativista conocido como “Shapiro delay”. Empleando estos datos hemos intentado encontrar la configuración original que ha evolucionado al sistema actualmente observado. Para ello hemos realizado una serie de cálculos evolutivos binarios tratando de tener en cuenta simultáneamente las masas de ambas componentes y el período orbital.

## 1. Introducción

PSR J1713+0747 fue descubierto en un relevamiento de pulsares de milisegundo (PMS) con el telescopio de 305 mts. de Areceibo (Foster, Wolszczan y Camilo 1993). Su período de rotación es de 4.57 ms. En 1993, Foster y colaboradores realizaron las primeras estimaciones de los parámetros orbitales del modelo binario de PSR J1713+0747. Encontraron una compañera enana blanca de baja masa en una órbita casi circular, con un período de 67.8 días. Pudieron estimar, además, la masa de la enana blanca a través de la función de masa. En un trabajo muy reciente, Splaver y colaboradores (2005), estudiando el efecto relativista conocido como “Shapiro delay”, han logrado determinar las masas de

ambas componentes del sistema con gran precisión:  $M_{EN} = 1.3 \pm 0.2 M_{\odot}$  para la estrella de neutrones, y  $M_{EB} = 0.28 \pm 0.03 M_{\odot}$  para la enana blanca. El valor de la masa de la estrella de neutrones obtenido por estos autores al combinar análisis estadísticos con la relación teórica período orbital - masa del núcleo es  $M_{EN} = 1.53^{+0.08}_{-0.06} M_{\odot}$  (68 % de confianza).

Un parámetro muy importante en los PMS es la *edad característica*  $\tau_{PSR}$ . Para el caso de radiación dipolar magnética se puede mostrar que  $\tau_{PSR} = P/(2\dot{P})$ . Splaver y colaboradores (2005) encontraron para PSR J1713+0747,  $\tau_{PSR} = 8$  giga-años.

Si el pulsar tiene una compañera enana blanca, esperamos que la edad de la enana blanca, contada desde el final del primer episodio de transferencia de masa<sup>1</sup> coincida con la edad característica del pulsar.

**Tabla 1**

Principales características de la componente enana blanca del sistema PSR J1713+0747, tomadas de Lundgren y colaboradores (1996). Los números entre paréntesis representan errores en los últimos dígitos citados.

Cantidad	Valor medido
$m_B$	$>27.1$
$m_V$	26.0(2)
$m_I$	24.1(1)
$B - V$	$>1.1$
$V - I$	1.9(2)
$m - M$	10.2(5)
$E_{B-V}$	0.08(2)

La compañera enana blanca de PSR J1713+0747 fue detectada por Lundgren y colaboradores (1996) mediante observaciones del Telescopio Espacial Hubble (ver la Tabla 1). Este hecho nos ofrece una importante posibilidad de confrontar la teoría con la observación.

## 2. El código evolutivo

Los cálculos del presente trabajo se han realizado utilizando el código de evolución binaria descrito en Benvenuto y De Vito (2004). El mismo emplea una técnica generalizada de Henyey que nos permite calcular la tasa de pérdida de masa de modo implícito (Benvenuto y De Vito 2003). Además, posee una detallada descripción de opacidades, ecuación de estado, reacciones nucleares y difusión; en el cálculo de la evolución orbital se han considerado los principales procesos de pérdida de momento angular: los que se llevan la materia que escapa del sistema, la radiación gravitatoria y el frenado magnético. Hemos despreciado la irradiación del PMS sobre la estrella donante.

En el tratamiento de la evolución orbital de los sistemas, hemos considerado que la estrella de neutrones es capaz de retener una fracción  $\beta$  del material proveniente de la estrella donante.

---

<sup>1</sup>Este primer episodio es el único capaz de transferir una cantidad de materia suficiente como para acelerar a la estrella de neutrones.

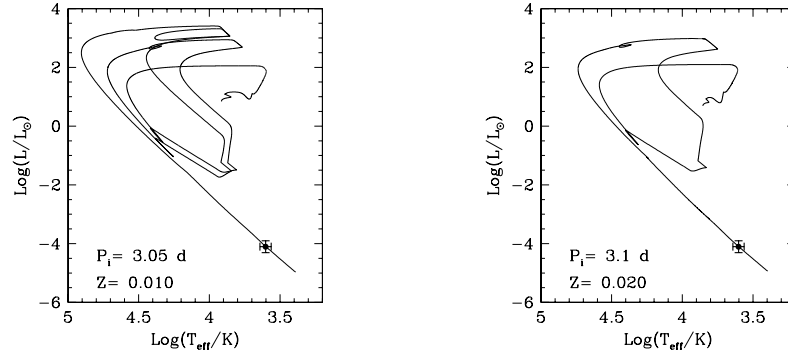


Figura 1. *Izquierda:* Camino evolutivo para el caso de metalicidad  $Z = 0.010$  y período inicial de 3.05 días. *Derecha:* Camino evolutivo para el caso de metalicidad  $Z = 0.020$  y período inicial de 3.10 días. Hemos incluido la luminosidad y la temperatura efectiva de la enana blanca en PSR J1713+0747 con sus correspondientes barras de error.

Hemos incorporado a nuestro código un modelo detallado de atmósfera no-gris para poder realizar un tratamiento apropiado de la etapa de enfriamiento de la enana blanca. Esto nos permite, además, determinar el flujo emergente desde la enana blanca e interpretar sus magnitudes y colores. Los procesos empleados en el cálculo de atmósferas en equilibrio termodinámico local están descritos en Rohrmann (2001) y Rohrmann y colaboradores (2002).

### 3. Resultados

Hemos calculado una grilla de modelos evolutivos con la intención de poder describir las características del sistema binario PSR J1713+0747. Los parámetros iniciales que nos condujeron a resultados exitosos fueron: masas iniciales de  $1.5 M_{\odot}$  para la componente normal, y  $1.4 M_{\odot}$  para la estrella de neutrones; dos posibles valores de la metalicidad de la estrella donante:  $Z = 0.010$  y  $0.020$ ; encontramos, además, que el valor más adecuado para nuestros propósitos resultó ser  $\beta = 0.10$ . En este marco, hallamos un par de soluciones exitosas, a nuestro criterio. En la Tabla 2 se muestran el período inicial, el período final, y las masas finales de la enana blanca y de la estrella de neutrones para cada valor de la metalicidad.

Tabla 2

$Z$	$P_i$ [d]	$P_f$ [d]	$M_{EB}$ [ $M_{\odot}$ ]	$M_{EN}$ [ $M_{\odot}$ ]
0.010	3.05	68.288	0.29945	1.51989
0.020	3.10	67.762	0.30338	1.51937

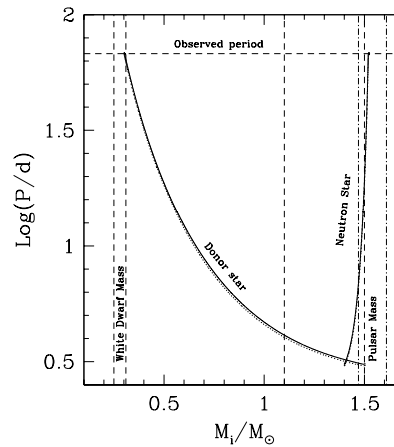


Figura 2. Período en función de la masa. Las líneas de puntos corresponden a  $Z = 0.010$ , mientras que las líneas sólidas a  $Z = 0.020$ . Las líneas verticales a trozos de la izquierda corresponden a la masa observada de la enana blanca con sus correspondientes barras de error, y en la derecha, la masa de la estrella de neutrones con sus correspondientes barras de error. La estimación de la masa de la enana blanca hecha con la relación período - masa del núcleo se muestra con la línea vertical de punto-rayas. La línea horizontal representa el período orbital observado.

En la Figura 1 mostramos los recorridos evolutivos de las estrellas normales seleccionadas para este trabajo. Ambas completan la quema de hidrógeno, evolucionan hacia la rama de las gigantes rojas y desarrollan una zona convectiva externa. En estas condiciones, la estrella donante llena el lóbulo de Roche y comienza la primera etapa de transferencia de masa. En el caso de  $Z = 0.010$  ocurren dos “flashes” termonucleares, mientras que para el caso de  $Z = 0.020$  sólo uno. Luego, la estrella se enfría como una enana blanca de helio con una capa externa rica en hidrógeno.

En la Figura 2 mostramos la evolución del período del sistema como función de las masas de las componentes del par. Para ambas metalicidades, las masas de la estrella donante finalmente caen dentro de la barra de error de  $1\sigma$ . En el caso de la estrella de neutrones, hallamos una masa levemente mayor que la encontrada por Splaver y colaboradores (2005), pero dentro de la barra de error permitido si se considera la relación teórica masa-radio.

En la Figura 3 mostramos los diagramas calculados color-color y magnitud-color. Las curvas de enfriamiento de  $Z = 0.010$  (líneas de puntos en la Figura 3) y de  $Z = 0.020$  (líneas llenas en la Figura 3) son esencialmente iguales, ya que ambos caminos evolutivos corresponden a masas estelares muy parecidas y a una composición atmosférica casi igual. La principal diferencia está en las edades de enfriamiento.

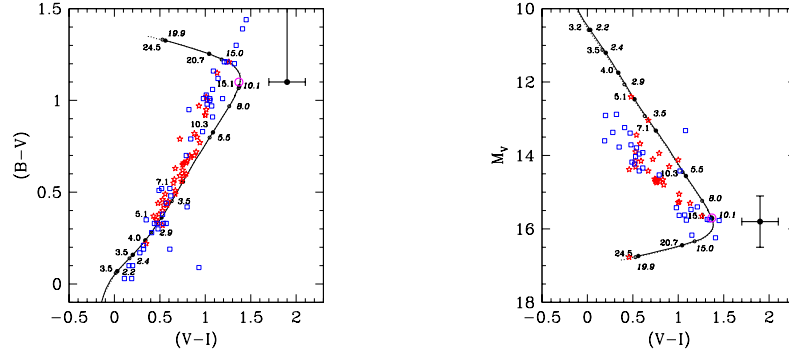


Figura 3. *Izquierda:* Diagrama color- color. *Derecha:* Diagrama magnitud - color. En círculos llenos están las edades (en giga-años) para el caso  $Z = 0.020$ , mientras que en círculos vacíos y en itálicas para  $Z = 0.010$ . Hemos incluido, además, observaciones de enanas blancas frías (en símbolos).

A medida que la estrella se enfría se hace importante la formación de hidrógeno molecular, y la opacidad debida a absorción inducida por colisiones del  $H_2$  es muy intensa en el infrarrojo, determinando la forma de la distribución de la energía espectral en los modelos de enanas blancas frías. En consecuencia, el color  $(V-I)$  se vuelve más azul cuando la temperatura efectiva cae por debajo de 3600 K. El “turnoff” de las secuencias de modelos de enanas blancas se encuentra en  $(V-I) \approx 1.4$ , con  $M_V \approx 15.8$  y  $(B-V) \approx 1.1$ .

Considerando una distancia paraláctica de  $1.1 \pm 0.1$  kpc (Lundgren y colaboradores 1996) se obtiene un módulo de distancia de  $m - M = 10.2 \pm 0.2$ . Si adoptamos una absorción interestelar de  $A_V = 0.1$ , la magnitud visual absoluta de la compañera del PMS obtenida es  $M_V = 15.7 \pm 0.4$  (cerca del “turnoff” de las secuencias evolutivas donde  $T_{eff} \approx 3600$  K), aunque aparece enrojecida en el color  $(V-I)$  (Figuras 3). El color  $(V-I)$  observado por Lundgren y colaboradores (1996) es muy rojo comparado con las predicciones de envolturas ricas de hidrógeno. Podría ocurrir que haya en la atmósfera una fuente de opacidad que no se ha considerado en este trabajo, o que no se trate de una composición rica en hidrógeno, como la que hemos supuesto aquí.

El espectro fotométrico se ajustó empleando las secuencias evolutivas de  $Z = 0.010$  y  $Z = 0.020$ . Los resultados pueden verse en la Figura 4 y en la Tabla 3.

Tabla 3

$T_{eff}(K)$	$\log(L/L_\odot)$	$\log g$	$M_V$	$(B-V)$	$(V-I)$	CB
4320	-3.95	7.373	15.032	0.932	1.218	-0.415
3670	-4.23	7.387	15.689	1.085	1.377	-0.364

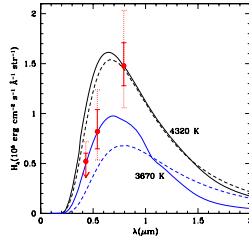


Figura 4. Distribución de energía de los modelos de atmósferas de enanas blancas con  $T_{eff} = 4320$  y  $3670$  K (líneas continuas) y espectros de cuerpo negro a esas mismas temperaturas (líneas quebradas). Las observaciones fotométricas se representaron con círculos llenos.

El flujo en la banda  $V$  puede representarse por un modelo con  $T_{eff} = 3670 \pm 280$  K, el cual también ajusta el límite superior detectado por la banda  $B$ . Sin embargo, para el caso del filtro  $I$  obtuvimos  $T_{eff} = 4320 \pm 180$  K. Finalmente, hemos adoptado  $T_{eff} = 4000 \pm 400$  K. Usando la relación  $T_{eff}$ –radio de nuestros cálculos evolutivos, determinamos una luminosidad en el rango  $-3.92 > \log(L/L_{\odot}) > -4.29$ . La Figura 1 muestra que la contraparte óptica detectada en PSR J1713+0747 se encuentra sobre los recorridos evolutivos de enfriamiento que hemos calculado.

En el caso de  $Z = 0.010$ , la estrella normal tardó  $7 \pm 2$  giga-años en llegar desde el final de su primera etapa de transferencia de masa hasta su estado final, mientras que para  $Z = 0.020$  ha sido de  $10.8 \pm 2$  giga-años. Esto indicaría que la estrella donante muy probablemente tenga metalicidad  $Z \approx 0.010$ .

#### 4. Conclusiones

Hemos realizado un experimento numérico en el que se ha calculado la evolución completa de un sistema binario para dar cuenta de las masas de las componentes y del período orbital del sistema PSR J1713+0747, y luego hemos podido analizar el estado de la enana blanca miembro de este par.

#### Referencias

- Benvenuto, O. G., De Vito, M. A. 2003, MNRAS, 342, 50
- Benvenuto, O. G., De Vito, M. A. 2004, MNRAS, 352, 249
- Foster, R. S., Wolszczan, A., Camilo, F. 1993, ApJ, 410, L91
- Lundgren, S. C., Foster, R. S., Camilo, F. 1996, ASP Conf. Ser. 105: IAU Colloq. 160: Pulsars: Problems and Progress, 105, 497
- Rohrman, R. D. 2001, MNRAS, 323, 699
- Rohrman, R. D., Serenelli, A. M., Althaus, L. G., Benvenuto, O. G. 2002, MNRAS, 335, 499
- Splaver, E. M., Nice, D. J., Stairs, I. H., Lommen, A. N., Backer, D. C. 2005, ApJ, 620, 405