

Nuevas estrellas preenanas blancas pulsantes de masa extremadamente baja descubiertas en el CASLEO

M. Corti^{1,2}, A. Kanaan³, A. Córscico^{1,4}, S.O. Kepler⁵, L. Althaus^{1,4}, D. Koester⁶ & J. Sánchez Arias^{1,4}

¹ *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina*

² *Instituto Argentino de Radioastronomía, CCT-La Plata, CONICET, Argentina*

³ *Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil*

⁴ *Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina*

⁵ *Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil*

⁶ *Institut für Theoretische Physik und Astrophysik, Universität Kiel, Kiel, Alemania*

Contacto / mariela@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / Las estrellas enanas blancas de masa extremadamente baja (ELM, por sus siglas en inglés, $M_* \lesssim 0.18\text{--}0.20 M_\odot$), podrían originarse como consecuencia de la gran pérdida de masa sufrida por una estrella gigante roja que formara parte de un sistema binario. Las enanas blancas de baja masa se han convertido en una fuente importante de estudio debido a que algunas de ellas son estrellas pulsantes. Esto último, constituye una oportunidad sin precedentes para conocer su interior y los canales evolutivos que conducen al origen de su formación, empleando la astrosismología. En este trabajo, presentamos resultados del análisis de datos fotométricos obtenidos en el CASLEO (Complejo Astronómico El Leoncito) de cuatro nuevas estrellas pulsantes que, de acuerdo a sus gravedades superficiales y temperaturas efectivas, serían estrellas preenanas blancas ELM. Con este descubrimiento, la cantidad de estrellas preenanas blancas pulsantes ELM conocidas hasta el momento se incrementaría a seis miembros.

Abstract / The Extremely Low Mass white dwarfs (ELM, $M_* \lesssim 0.18\text{--}0.20 M_\odot$) could arise after the loss of large amount of mass suffered by a red giant star in a binary system. The low mass white dwarfs have become an important source of study because some of them are pulsating stars. The latter is an unprecedented opportunity to know their interior and the evolutionary channels leading to their origin, by employing asteroseismology. In this paper, we present photometric analysis of data obtained in the CASLEO (Complejo Astronómico El Leoncito) about four new pulsating stars, that according to their surface gravities and effective temperatures, would be pre-ELM white dwarf stars. With this discovery, the number of pulsating pre-ELM white dwarf stars known would increase to six members.

Keywords / stars: low-mass — stars: oscillations — stars: white dwarfs

1. Introducción

Las estrellas variables pulsantes conocidas como enanas blancas de masa extremadamente baja (ELM, por sus siglas en inglés) se originan en la evolución binaria. Poseen masas por debajo de $M_* \sim 0.20 M_\odot$ con envolturas muy gruesas de H (tipo espectral DA) que soportan intensa quema nuclear del H con escalas evolutivas muy largas ($\sim 10^9$ a).

Recientemente, se descubrieron estrellas ELM que pulsan (Hermes et al., 2012), lo cual es muy importante ya que empleando la nueva técnica de investigación conocida como astrosismología, se pueden testear los canales evolutivos de estas estrellas. Las estrellas ELM pulsantes poseen períodos de pulsación comprendidos entre 1000 y 6000 s y se las conoce como las enanas blancas pulsantes más frías, con temperaturas comprendidas entre 7000 y 15 000 K.

El objetivo de nuestra investigación, es buscar nuevas estrellas enanas blancas y preenanas blancas de baja masa pulsantes y luego conociendo sus períodos de pulsación, emplear la astrosismología para conocer sus interiores y canales evolutivos.

2. Datos

El material observacional consiste en fotometría de alta velocidad obtenida de las estrellas SDSS J145847.02+070754.46 (de ahora en más J1458+0707) y SDSS J173001.94+070600.25 (de ahora en más J1730+0706) en las noches del 24 al 26 de abril de 2015 (2015A) y de las estrellas SDSS J222009.74-092710.00 (de ahora en más J2220-0927) y SDSS J201740.14-114740.51 (de ahora en más J2017-1147) en las noches del 20 y 21 de agosto de 2015 (2015B). Para ello se empleó el telescopio “Jorge Sahade” de 2.15 m del Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO), San Juan. Con el mismo se usó el detector CCD Roper 2048B de 2048×2048 px de $13.5 \mu\text{m}$ con un promediado de píxels de 2×2 para disminuir su tiempo de lectura. Se logró una resolución de $0.3'' \text{ px}^{-1}$ y el campo de trabajo se redujo a $2' \times 2'$. Con el objetivo de reducir el fondo de cielo presente en las imágenes estelares, se empleó el filtro azul de 3 mm BG40. El tiempo de integración de cada exposición fue de 120 s. En el transcurso de las noches de observación de los períodos 2015A y 2015B se trabajó con un *seeing*

Tabla 1: Datos observacionales y parámetros físicos de las estrellas observadas.

ID SDSS	Int. [h]	g [mag]	T_{ef} [K]	$\log g$	P [s]
J145847+070754	7	15.3	7925	4.2	3278.7 1633.9
J173001+070600	3	16.4	7972	4.2	3367.1
J222009-092710	7	15.8	7943	5.6	2066.1
J201740-114740	9	17.0	7462	4.9	2651.1 1830.2 1269.7

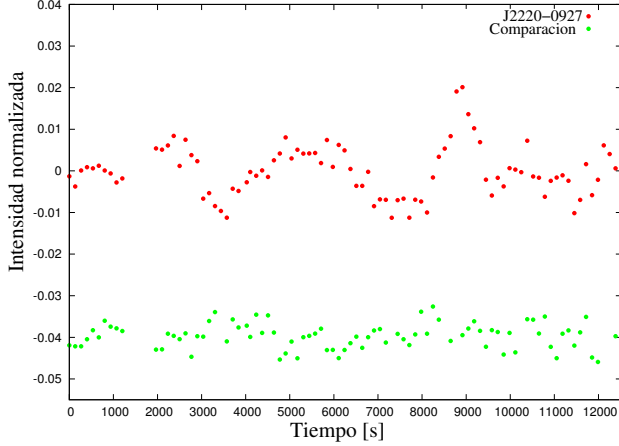


Figura 1: CL superior: variación temporal del brillo de la estrella J2220-0927. CL inferior: variación temporal del brillo de la estrella de comparación.

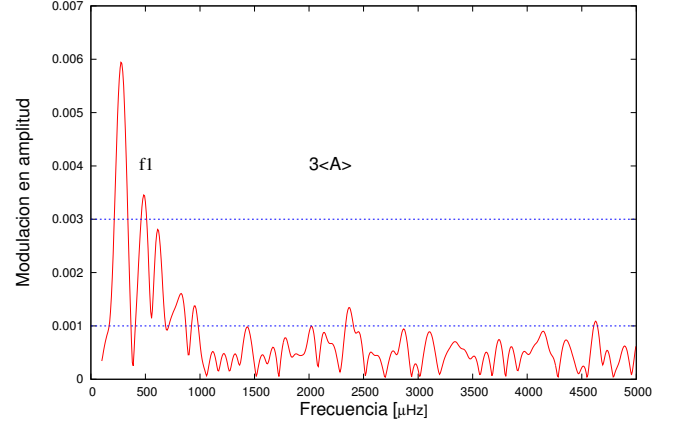
variable entre $2''$ y $4''$. En cada noche se obtuvieron *bias* y *flats* de cúpula. Se realizó fotometría de apertura con los paquetes de IRAF CCD_{hsp} (Kanaan et al., 2002).

Las estrellas candidatas a enanas blancas ELM pulsantes fueron seleccionadas por su magnitud g , T_{ef} , $\log g$ y coordenadas. Los datos T_{ef} y $\log g$ fueron obtenidos del estudio de sus respectivos espectros publicados en la publicación de datos #12 (DR12) del *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS; Kepler et al., 2015). Estos parámetros junto al tiempo de integración total empleado para cada estrella y el/los período/s de pulsación medido/s en ellas, se listan en la Tabla 1.

3. Análisis

Las estrellas que se mencionan en este trabajo, fueron clasificadas con tipo espectral A empleando el código ELOIDE del SDSS (Prugniel & Soubiran, 2001). Los espectros de las mismas, publicados en el relevamiento del SDSS, se ajustaron muy bien a los modelos de espectros sintéticos no magnéticos obtenidos de modelos de atmósferas de H en equilibrio termodinámico local (Koester, 2010). Estos modelos cubren un rango de $6000 < T_{\text{ef}} < 100\,000$ K y $3.75 \leq \log g \leq 10.0$, lo cual permite estudiar a las estrellas de secuencia principal, las subenanas y las enanas blancas.

A las estrellas candidatas a variables de baja masa, se les midió la luz recibida en intervalos de tiempo de


 Figura 2: TDF de las observaciones obtenidas de la estrella J2220-0927. El período de pulsación de 2066.1 s se indica como $f_1 = 484 \mu\text{Hz}$.

pocos segundos, en este caso cada intervalo fue de 120 s con el objetivo de obtener varios puntos por ciclo en el transcurso de algunas horas. Luego, todas las imágenes fueron corregidas por *bias* y por *flat*.

A continuación, se realizó fotometría de apertura en todas las estrellas, para lo cual, el radio de apertura ajustado a cada estrella fue de 12 px. El anillo del cielo empleado para substraer el mismo a la estrella tuvo un radio interior de 20 px y un radio exterior de 26 px. La Fig. 1 muestra la curva de luz (CL) de la estrella J2220-0927 (CL superior) dividida por la intensidad resultante de sumar cada una de las tres estrellas más luminosas del campo, elegidas como estrellas de comparación. De este modo, se eliminaron las fluctuaciones atmosféricas, la emisión de la Luna, presencia de nubes, etc. Se asegura así que la variabilidad fotométrica observada en la estrella sea intrínseca de la misma. La CL inferior de la Fig. 1 pertenece a una estrella de comparación ubicada en el campo de J2220-0927 con un flujo similar al de ella. A esta comparación se le realizó el mismo análisis que a la estrella en estudio con el objetivo de finalmente comparar ambas CL. El paso final consistió en dividir la intensidad de cada punto de la CL resultante por el valor medio de la misma curva para dejarla normalizada y luego restarle 1, para centrar la CL en el eje de intensidad = 0.

Cuando se llevan a una misma CL los puntos de la estrella obtenidos en el transcurso de varias noches de observación, es decir, distintos períodos de tiempo, la fecha juliana correspondiente a cada punto debe ser corregida al baricentro del Sistema Solar. Luego de ello, la CL ya queda preparada para aplicarle la transformada discreta de Fourier (TDF) de serie temporal de paso no constante y obtener con ello, un espectro de frecuencia vs. amplitud. Es muy importante emplear una TDF de paso no constante, para evitar que el resultado se modifique debido a estar trabajando con grupos de datos separados por varias horas de tiempo.

Finalmente, se calcula un valor medio de amplitud $\langle A \rangle$ y se considera real al pico de emisión con intensidad superior a tres veces dicho valor ($3\langle A \rangle$), la frecuencia

de ese pico de emisión se corresponde con el período de pulsación (Fig. 2). Cuando se trabaja con datos de la estrella obtenidos en más de una noche de observación, es posible que al aplicarles la TDF se genere un pulso alias. La identificación del mismo se consigue construyendo la llamada función ventana espectral. Esto consiste en generar una función seno sintética con nuestros datos de la estrella y aplicarle la TDF. La frecuencia en la cual se observe un máximo de emisión, coincidente con la frecuencia del máximo de emisión obtenido del análisis de los datos de la estrella, será un pulso alias que deberá descartarse como propio de la estrella. El análisis efectuado en los datos de estas estrellas es muy similar al presentado en Corti et al. (2015) para las enanas blancas variables ZZ Ceti.

4. Discusión

Las siete estrellas enanas blancas ELM pulsantes, conocidas hasta el momento (Hermes et al., 2012, 2013; Kilic et al., 2015; Bell et al., 2015) tienen $7500 < T_{\text{ef}} < 10000$ K y $6 < \log g < 7$ y están indicadas con puntos rojos en el diagrama $T_{\text{ef}} - \log g$ (Fig. 3). En él se muestran también con líneas negras llenas los caminos evolutivos de enanas blancas de baja masa con núcleos de He, calculados por Althaus et al. (2013) en el rango de masas de 0.1554 a $0.4352 M_{\odot}$ y el camino evolutivo de estrellas con $0.148 M_{\odot}$ obtenido por Serenelli et al. (2001) (líneas negras a trazos). Las estrellas estudiadas en el CASLEO se indican con símbolos de cruces negras y naranjas turnos 2015A y 2015B, respectivamente. Las mismas comparten su posición en el diagrama con las ya conocidas estrellas preenanas blancas pulsantes WASP J0247–25B y WASP J1628+10B (Maxted et al., 2013, 2014).

Claramente, dada la muy baja gravedad superficial de las estrellas que investigamos ($\log g \sim 5$), ellas no pueden ser identificadas como enanas blancas de baja masa o ELM, aunque sí como estrellas pre enanas blancas de baja masa. La masa de J1730+0706 y J1458+0707 sería de $\sim 0.176 M_{\odot}$ y sería de $\sim 0.148 M_{\odot}$ para las otras dos estrellas.

Si la hipótesis de que estas estrellas son precursoras de enanas blancas de baja masa es correcta, podremos decir finalmente que las nuevas estrellas pulsantes reportadas en este trabajo, son del mismo tipo que las pulsantes preenanas blancas WASP J0247–25B y WASP J1628+10B. Notemos que los períodos de pulsación comprendidos entre 1269 y 3367 s que muestran nuestras estrellas en estudio son mayores a los presentados por WASP J0247–25B y WASP J1628+10B, comprendidos en el rango de 400 a 800 s (Maxted et al., 2013, 2014).

5. Conclusiones

Con datos fotométricos obtenidos en el CASLEO, se descubrieron 4 estrellas preenanas blancas pulsantes ELM, incrementando el número conocido de objetos de esta clase de 2 a 6.

El descubrimiento de nuevas estrellas preenanas blancas ELM pulsantes permite vislumbrar una nueva

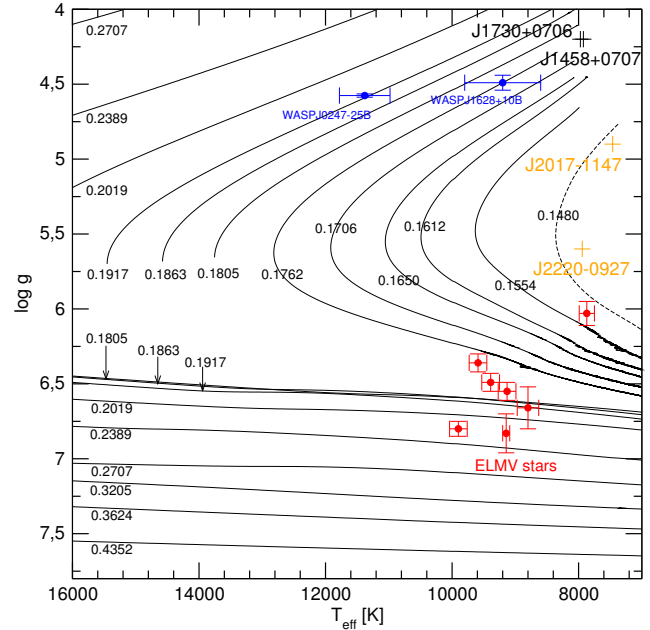


Figura 3: Diagrama $T_{\text{ef}} - \log g$ con los caminos evolutivos de enanas blancas de baja masa con núcleos de He (Althaus et al., 2013) (líneas negras llenas) y de estrellas con $M_{\star} = 0.148 M_{\odot}$ (Serenelli et al., 2001) (líneas negras a trazos). Los números indican el valor de masa estelar de cada camino evolutivo. Los períodos evolutivos con flashes de quema de CNO que tienen lugar en las estrellas con $M_{\star} > 0.1762 M_{\odot}$ no se muestran en la figura.

banda de inestabilidad pulsacional asociada a los últimos estadios evolutivos de estrellas de baja masa. Esto permitirá tener un conocimiento más amplio de la historia evolutiva de sus estrellas progenitoras.

Agradecimientos: MAC: Astrónoma visitante en CASLEO, el cual es operado bajo el acuerdo entre el CONICET y las Universidades Nacionales de La Plata, Córdoba y San Juan. MAC, AHC y LGA agradecen al CONICET (PIPs 112-201201-00226 y 112-201101-00812).

Referencias

- Althaus L. G., Miller Bertolami M. M., Córscico A. H., 2013, *A&A*, 557, A19
 Bell K. J., et al., 2015, in Dufour P., Bergeron P., Fontaine G., eds, 19th European Workshop on White Dwarfs Vol. 493 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, SDSS J1618+3854: The Sixth Extremely Low-Mass White Dwarf Pulsator. p. 217
 Corti M. A., et al., 2015, *BAAA*, 57, 135
 Hermes J. J., et al., 2013, *MNRAS*, 436, 3573
 Hermes J. J., et al., 2012, *ApJL*, 750, L28
 Kanaan A., Kepler S. O., Winget D. E., 2002, *A&A*, 389, 896
 Kepler S. O., et al., 2015, *MNRAS*, 446, 4078
 Kilic M., et al., 2015, *MNRAS*, 446, L26
 Koester D., 2010, *Mem. Soc. Astron. Italiana*, 81, 921
 Maxted P. F. L., et al., 2014, *MNRAS*, 444, 208
 Maxted P. F. L., et al., 2013, *Nature*, 498, 463
 Prugniel P., Soubiran C., 2001, *A&A*, 369, 1048
 Serenelli A. M., et al., 2001, *MNRAS*, 325, 607