

Determinación de tasas de acreción en enanas blancas DA con discos *debris*

L. Saker^{1,2}, L. Althaus³, & E. Jofré^{1,4}

¹ Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

² Secretaría de Ciencia y Tecnología, UNC, Argentina

³ Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

Received: 09 February 2024 / Accepted: 16 May 2024

©The Authors 2024

Resumen / En los últimos años, el número de enanas blancas que acretan un disco de tipo *debris* ha aumentado significativamente. Dicho disco se forma mediante la destrucción por efecto de marea de cuerpos rocosos menores que originalmente formaban un sistema planetario. La caracterización de estos discos, por lo tanto, nos proporciona información importante sobre el sistema planetario original. Más aún, la determinación de las tasas de acreción nos permite estimar la masa de dicho sistema. En esta contribución, se realizan simulaciones numéricas utilizando el código de evolución estelar LPCODE, con el objetivo de determinar las tasas de caída de material en una muestra de enanas blancas con atmósferas de hidrógeno (DA) que tienen abundancias bien determinadas en la literatura. En las simulaciones, se tiene en cuenta el proceso físico desestabilizante conocido como convección termohalina.

Abstract / In recent years, the number of white dwarfs accreting a debris disk has increased significantly. Such disk is formed by the tidal destruction of minor rocky bodies that originally formed a planetary system. The characterization of these disks, therefore, provides important information about the original planetary system. Moreover, the determination of the accretion rates allows us to estimate the mass of such a system. In this contribution, numerical simulations are performed using the LPCODE stellar evolution code to determine the material fall-out rates in a sample of white dwarfs with hydrogen atmospheres (DA) that have abundances well determined in the literature. In the simulations, the destabilizing physical process known as fingering convection is taken into account.

Keywords / white dwarfs — stars: abundances — accretion, accretion disks

1. Introducción

Al presente, está bien establecido que la presencia de planetas y cuerpos rocosos menores (como asteroides y cometas), es común alrededor de estrellas de secuencia principal. Más aún, se espera que estos sobrevivan a las distintas etapas de la evolución estelar (Debes & Sigurdsson, 2002). Teniendo en cuenta que las enanas blancas (EBs) son los remanentes estelares más comunes en la Galaxia, la búsqueda y caracterización de sistemas planetarios en estas estrellas ha sido objeto de considerable interés durante las últimas décadas.

Se estima que entre el 25-50% de las EBs con $T_{eff} \leq 2.5 \times 10^4$ K presentan elementos más pesados que He en sus atmósferas (Zuckerman et al., 2003, 2010; Koester et al., 2014). Dado que las escalas de tiempo de sedimentación gravitatoria son mucho más cortas que el tiempo de enfriamiento evolutivo, estos elementos pesados detectados no pueden ser primordiales (Paquette et al., 1986). Por otro lado, gracias a relevamientos llevados a cabo por misiones espaciales (*Spitzer*, *WISE* y *Gaia*) se conocen ~60 EBs que además de tener metales en sus atmósferas, presentan excesos infrarrojos (IR) en sus distribuciones espectrales de energía (SEDs, Gentile Fusillo et al., 2021).

La detección de elementos pesados junto con los excesos IR en sus SEDs, se atribuyeron a la presencia de un disco de polvo o tipo *debris* que está siendo acretado por la estrella. Dicho disco se forma mediante la destrucción por efecto de marea de cuerpos rocosos menores que originalmente formaban un sistema planetario (Jura, 2003). En los últimos años, la detección de planetesimales en desintegración alrededor de EBs con discos tipo *debris*, confirmó dicho modelo (Vanderburg et al., 2015; Manser et al., 2019; Vanderbosch et al., 2020). Cabe destacar que la mayoría de los estudios espectroscópicos determinaron que los discos se formaron a partir de cuerpos rocosos cuya composición es en su mayoría similar a la composición global de la Tierra, siendo Fe, Mg, Si y O los elementos dominantes (Jura & Young, 2014; Xu et al., 2019).

Por lo tanto, el estudio de las EBs contaminadas permite obtener la composición química de los planetesimales que orbitan a la estrella y comprender mejor los diversos procesos físicos que intervienen en la evolución de los sistemas planetarios. Más aún, la determinación de las tasas de acreción nos provee información acerca de la masa del sistema planetario original.

Estimaciones previas de las tasas de acreción en EBs con discos *debris* asumen que el material acretado es

Tabla 1. Características de las EBs analizadas, obtenidas de MWDD.

EB	Tipo Espectral	T_{eff} [K]	Masa [M_{\odot}]	log g
G166–58	DAZ	11239	0.61	8.01
PG 1541+651	DAV	7381	0.56	7.98

mezclado homogéneamente en la zona de convección superficial, y luego difundido hacia el interior estelar (*Mixing Length Theory*, Dupuis et al., 1992; Farihi et al., 2012; Koester et al., 2014). Sin embargo, estas estimaciones no tienen en cuenta que el material acretado posee un peso molecular mayor al peso molecular de la atmósfera de la estrella. Este gradiente inverso en peso molecular produce turbulencias, las cuáles generan que el material acretado sea re-mezclado y diluido. Este proceso físico se conoce como *fingerling convection* ó convección termohalina. Cabe señalar que sin la inclusión de este proceso físico, las tasas de acreción calculadas en EBs con envolturas de H son subestimadas en varios órdenes de magnitud (Wachlin et al., 2017; Bauer & Bildsten, 2018, 2019).

En esta contribución, realizamos simulaciones numéricas utilizando el código de evolución estelar LPCODE, con el objetivo de determinar tasas de caída de material en dos EBs de tipo espectral DA (atmósferas de H) con discos de polvo, y abundancias bien determinadas en la literatura.

2. Muestra analizada y LPCODE

Las estrellas fueron seleccionadas de la muestra de EBs que poseen un disco de polvo confirmado de la base de datos *Montreal White Dwarf Database (MWDD)**. Teniendo en cuenta que EBs con atmósferas de H desarrollan una envoltura convectiva a $T_{eff} \sim 1.5 \times 10^4$ K, elegimos dos objetos de tipo espectral DA, con temperaturas que permitieran asegurar la presencia de dicha envoltura y que tuvieran las abundancias de los elementos de interés bien determinadas en la literatura. Las características de G166–58 y PG 1541+651, las 2 EBs analizadas, se muestran en la Tabla 1.

Para determinar las tasas de acreción, utilizamos el código de evolución estelar LPCODE (Althaus et al., 2005, 2015; Miller Bertolami, 2016, etc.). Dicho código ha sido ampliamente probado y utilizado en diversos contextos de evolución estelar de estrellas de baja masa. Wachlin et al. (2017) adaptó LPCODE para poder simular los efectos de la caída de material tipo planetario sobre EBs:

- Incorpora la convección termohalina, utilizando la teoría de la doble difusión desarrollada por Grossman et al. (1993),
- asume que la acreción es un proceso continuo y el material es distribuido uniformemente en la superficie de la estrella,
- permite seguir la evolución de elementos químicos que no se encontraban presentes en la versión original: Mg, Si, Ca y Fe,

*<https://montrealwhitedwarfdatabase.org/home.html>

- permite establecer distintas abundancias para el material acretado

El código ha sido utilizado con éxito en la determinación de las tasas de acreción de WD 0307+077 y WD 2115+560, dos EBs con discos de polvo (ver Saker et al., 2022).

Para cada objeto, arrancamos con un modelo inicial de una EB de Renedo et al. (2010) con una envoltura de H estándar ($M_H \sim 10^{-4} M_{\odot}$). Para G166–58 utilizamos un modelo inicial con una masa $M = 0.55 M_{\odot}$ y para PG 1541+651, $M = 0.60 M_{\odot}$. Dado que los modelos iniciales presentan temperaturas elevadas ($T_{eff} \sim 9 \times 10^4$ K), el primer paso fue enfriarlos, mientras se difundían sus elementos. Cuando la estrella llegó a una $T_{eff} \sim 5 \times 10^4$ K, agregamos los nuevos elementos con abundancias iniciales en proporciones solares. Finalmente, cuando el modelo llegó a la T_{eff} de la estrella, detuvimos su enfriamiento y activamos la acreción. Dado que la mayoría de los estudios indican que la composición química del material acretado por EBs tiende a ser similar a la abundancia de distintos cuerpos rocosos del sistema solar, establecimos una abundancia tipo *bulk earth* para el material acretado (Allègre et al., 2001), y tomamos valores para las tasas de acreción entre $dM/dt = 10^6 - 10^{9.5} g/s$ (ver Wachlin et al., 2022). Las opacidades radiativas que utilizamos, las obtuvimos de las tablas OPAL** para diferentes metalicidades.

3. Resultados obtenidos

La mejor aproximación a las abundancias obtenidas de la literatura para G166–58 y PG 1541+651, la obtuvimos con una tasa de acreción $dM/dt = 10^{6.2} g/s$ y $dM/dt = 10^9 g/s$, respectivamente. En la Tabla 2, presentamos las abundancias reportadas en la literatura, y las abundancias obtenidas con nuestras simulaciones, para las tasas de acreción mencionadas. En el panel izquierdo de la Fig. 1 se muestran los perfiles químicos internos obtenidos de los elementos H, He, O, Mg, Si, Ca, y Fe, para G166–58. En color rojo vemos la zona convectiva (CZ) donde el material es mezclado homogéneamente y por debajo de esta región observamos (en color azul) la zona de la convección termohalina (TCZ). Allí podemos ver que la abundancia de cada elemento disminuye ligeramente, debido al mezclado extra de material.

En el panel derecho de la Fig. 1, se presenta la evolución de la estructura estelar en función del tiempo para G166–58. Allí se puede ver que la zona de la TCZ crece rápidamente cuando comienza la acreción. Esto provoca que se diluyan los elementos pesados, y se reduzca la contaminación de la superficie.

4. Síntesis y conclusiones

Para este trabajo determinamos las tasas de acreción en 2 EBs que tienen un disco de polvo confirmado, utilizando el código de evolución estelar LPCODE. Para nuestras simulaciones, tuvimos en cuenta el proceso físico conocido como convección termohalina y establecimos

**<https://opalopacity.llnl.gov/existing.html>

Tabla 2. Abundancias de la literatura y obtenidas en este trabajo con el LPCODE para los objetos de la muestra.

EB	$\log(Mg/H)$	$\log(Si/H)$	$\log(Ca/H)$	$\log(Fe/H)$	Ref.
G166–58	–8.1	< –8.2	–9.3	–8.2	Xu et al. (2019)
	–8.2	–8.2	–9.4	–8.4	este trabajo
PG 1541+651	< –6.5	< –5.70	–7.4	< –6.0	Xu et al. (2019)
	–6.1	–6.1	–7.3	–6.2	este trabajo

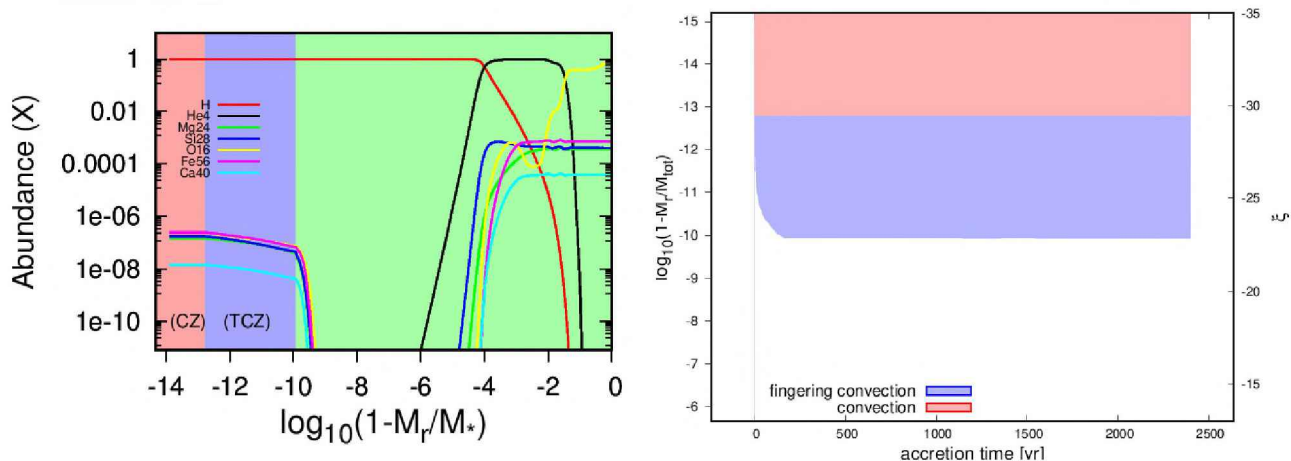


Fig. 1. *Panel izquierdo:* Abundancia de los distintos elementos químicos analizados en función de la profundidad, para G166–58. En color rojo, se presenta la zona convectiva (CZ) y en azul la zona de la convección termohalina (TCZ). *Panel derecho:* Evolución de la estructura estelar en función del tiempo, para G166–58. En color rojo, se presenta la zona convectiva y en azul la región de la convección termohalina.

una abundancia tipo *bulk earth* para el material acreta-do.

Como se puede ver en la Fig. 1, el mezclado extra del material debido a la convección termohalina implica que son necesarias tasas de acreción mayores a las reportadas en la literatura. Por lo tanto, los cuerpos rocosos que fueron destruidos y formaron el disco de polvo, tienen una masa mayor a la estimada sin tener en cuenta dicho proceso físico.

Con el objetivo de mejorar nuestro entendimiento de las etapas finales de los sistemas planetarios, seguiremos determinando las tasas de acreción en EBs con discos *debris* teniendo en cuenta todos los procesos físicos que afectan al material acreta-do. Para ello, obtendremos observaciones espectroscópicas (propias o de la literatura) de estrellas con discos confirmados que no tienen abundancias reportadas, o candidatas que presentan excesos IR en sus SEDs y no se les ha determinado aún la abundancia atmosférica.

Referencias

Allègre C., Manhès G., Lewin É., 2001, *Earth and Planetary Science Letters*, 185, 49

- Althaus L.G., et al., 2005, *A&A*, 435, 631
Althaus L.G., et al., 2015, *A&A*, 576, A9
Bauer E.B., Bildsten L., 2018, *ApJL*, 859, L19
Bauer E.B., Bildsten L., 2019, *ApJ*, 872, 96
Debes J.H., Sigurdsson S., 2002, *ApJ*, 572, 556
Dupuis J., et al., 1992, *ApJS*, 82, 505
Farihi J., et al., 2012, *MNRAS*, 424, 464
Gentile Fusillo N.P., et al., 2021, *MNRAS*, 508, 3877
Grossman S.A., Narayan R., Arnett D., 1993, *ApJ*, 407, 284
Jura M., 2003, *ApJL*, 584, L91
Jura M., Young E.D., 2014, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42, 45
Koester D., Gänsicke B.T., Farihi J., 2014, *A&A*, 566, A34
Manser C.J., et al., 2019, *Science*, 364, 66
Miller Bertolami M.M., 2016, *A&A*, 588, A25
Paquette C., et al., 1986, *ApJS*, 61, 197
Renedo I., et al., 2010, *ApJ*, 717, 183
Saker L., Wachlin F.C., Althaus L.G., 2022, *Actas de las Cuartas Jornadas de Astrofísica Estelar*, 13, 65
Vanderbosch Z., et al., 2020, *ApJ*, 897, 171
Vanderburg A., et al., 2015, *Nature*, 526, 546
Wachlin F.C., et al., 2017, *A&A*, 601, A13
Wachlin F.C., et al., 2022, *A&A*, 660, A30
Xu S., et al., 2019, *AJ*, 158, 242
Zuckerman B., et al., 2003, *ApJ*, 596, 477
Zuckerman B., et al., 2010, *ApJ*, 722, 725