

Análisis Espectral de la Estrella Post-AGB HD 172481

Spectral Analysis of the Post-AGB Star HD 172481

Rosenzweig Levy, Patricia^{1*}; García Lugo, Gabriela¹; Pérez, Carlos¹; Pooley, Dan²

¹Grupo de Astrofísica Teórica, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida, 5101, Venezuela

²Notting Hill Tutors, David Game College, London, United Kingdom

*patricia@ula.ve

Resumen

Se analizó un espectro de la estrella HD 172481, obtenido el 11 de agosto de 2003, utilizando un CCD incorporado al espectrógrafo HERCULES, acoplado al telescopio reflector de 1-m Mclellan del Observatorio Mt John, de la Universidad de Canterbury (Nueva Zelanda). Dicho espectro cubre la región $\lambda\lambda \sim 4.500 - 7.080 \text{ \AA}$ con $R = 41.000$, distribuidos en 49 órdenes y con una dispersión de $\sim 2 \text{ \AA/mm}$. Siguiendo criterios de selección estándar, se identificaron 86 líneas fotosféricas, además de las líneas $H\alpha$ y $H\beta$ de la serie de Balmer. Aplicando el efecto Doppler, se determinó la velocidad radial para cada línea fotosférica y se aplicó la corrección baricéntrica. Además, se calculó la velocidad radial promedio, así como su desviación estándar, obteniendo un valor de $(-83,1 \pm 0,6) \text{ km/s}$. Las velocidades radiales de las líneas $H\alpha$ y $H\beta$ son $-71,9 \text{ km/s}$ y $-69,8 \text{ km/s}$, respectivamente. En el rango del espectro analizado, no se encontraron líneas con perfil P-Cygni, ni en emisión; con la excepción de la línea $H\alpha$ que muestra la parte central en absorción y las componentes azul y roja en emisión, siendo la azul más intensa que la roja. La presencia de estas emisiones y la absorción en la parte central de la línea, son características comunes en estrellas post-AGB. La diferencia marcada entre la velocidad radial de las líneas fotosféricas y las de la serie de Balmer es típico para las estrellas supergigantes, tal como lo es HD 172481.

Palabras claves: Estrellas Post-AGB, Velocidad radial; Líneas fotosféricas.

Abstract

A high-resolution spectrum of a post-AGB star HD 172481, obtained in August 11, 2003, with the Mclellan 1-m reflector telescope of Mt. John Observatory of the University of Canterbury (New Zealand), was analyzed. This spectrum covers the region $\lambda\lambda \sim 4500 - 7080 \text{ \AA}$, with $R = 41000$, distributed in 49 orders and a dispersion of $\sim 2 \text{ \AA/mm}$. Applying standard selection criteria for the photospheric lines, with a baricentric correction, the individual radial velocities of each line was calculated. With the identification of 86 lines for HD 172481, the radial velocities derived is $(-83.1 \pm 0.6) \text{ km/s}$. In addition, the Balmer series lines $H\alpha$ and $H\beta$, were observed. The calculated radial velocities for these lines are -71.9 km/s and -69.8 km/s , respectively. In the region of the analyzed spectrum, no lines with P-Cygni profile, nor in emission, were found. With an exception, $H\alpha$ shows its central part in absorption and the blue and red components in emission. The blue component is more intense than the red component. The presence of these emissions and the absorption in the central part of the line, are common features in post-AGB stars. The large difference between the radial velocity of the photosphere lines and the radial velocities of the Balmer series lines is typical for supergiant stars, as is the case for HD 172481.

Keywords: Post-AGB stars; Radial velocity; Photospheric lines.

1 Introducción

Las estrellas de la rama gigante post-asintóticas (Post AGB stars), se encuentran en la última etapa de la evolución de las estrellas de poca masa y masa intermedia, por lo cual se ubican entre las etapas de la rama asintótica de las gigantes y Nebulosa Planetaria (Planetary Nebulae, PN). Estas estrellas se distinguen por poseer una masa $M < 9 M_{\odot}$ (Van Winckel, 2003) y también son conocidas como PPN (Proto-Planetary Nebulae).

La composición química de la atmósfera de las estrellas post-AGB y de su medio circunestelar, está determinada por la nucleosíntesis y los eventos de dragado que ocurren al final de su etapa como estrella AGB (Karttunen et al. 2006). Estas estrellas tienen un núcleo compuesto por carbono y oxígeno, rodeado por conchas de helio e hidrógeno que van quemándose y por encima de las cuales se encuentra una profunda envoltura convectiva. En sus cálculos sobre las estrellas AGB, Lattanzio (1997) predijo que para estrellas con $M > 4 M_{\odot}$, el fondo de la envoltura convectiva penetra en las regiones más calientes de la envolvente donde las capturas de protones ya han modificado la composición original de Carbono-Nitrógeno-Oxígeno (CNO). Este proceso, recibe el nombre de “*quema de fondo caliente*” (Hot Bottom Burning - HBB) y trae como consecuencia muchos cambios importantes en la composición química de la envolvente. La fase de pulsación térmica, aunque es mucho más corta que la fase de AGB temprana, es responsable, mediante considerables pérdidas de masa, de la eyección de gran parte del C y los elementos del proceso s, al medio (Karttunen y col., 2006). Además, en esta fase los pulsos térmicos son causados por inestabilidades en la concha de quemado de He, descubierta por primera vez por Schwarzschild y Härm (1965) y Weigert (1966). El exceso de energía generada por los *flashes* en la concha de He es transportado por convección. La expansión y enfriamiento de las regiones entre las conchas, que ocurren durante una fase donde los *flashes* de He dejan de suceder, provoca que la envoltura convectiva sea más profunda en regiones que contienen los productos de la quema parcial de He. El ^{12}C , el ^{19}F y los elementos resultantes del proceso s, se mezclan en la capa exterior causando variaciones de la abundancia química en la superficie de estas estrellas (Karttunen y col., 2006). Este proceso, conocido como tercer dragado, es capaz de explicar la formación de las estrellas de carbón (Busso y col., 1999, Wallerstein y col., 1997, Mowlavi 1999).

Más aún, las estrellas post-AGB, se caracterizan por la presencia de vientos estelares fuertes y una expulsión de masa de $\sim 10^{-7}$ a $10^{-4} M_{\odot}/\text{año}$ (Van Winckel 2003). De hecho, se cree que la etapa como AGB, termina con una fase final acentuada de pérdida de masa producto de súper vientos que origina un material circunestelar que luego se ioniza para crear una Nebulosa Planetaria. Posteriormente, las estrellas

post-AGB se enfrían y evolucionan a través del diagrama HR hacia la etapa de estrellas Enanas Blancas donde culmina su vida.

Todas estas características mencionadas, ocasionan que las estrellas post-AGB presenten variabilidades que se ponen de manifiesto en algunos de sus parámetros físicos básicos, como es el caso de la velocidad radial. Es este trabajo, se analiza un espectro de alta resolución de la estrella post-AGB HD 172481, con el fin de derivar su velocidad radial; como parte de un extenso estudio sobre este parámetro, que viene realizando el Grupo de Astrofísica Teórica de la Universidad de Los Andes desde hace varios años (García y col., 2003; Porras y col., 2004, Guzmán y col., 2008, Rosenzweig y col., 1997, 2012; 2016). Todo ello, con el propósito de nutrir una base de datos, homogénea y precisa, de velocidades radiales de estrellas tipo supergigantes y post-AGB, para así contribuir al estudio de este importante parámetro físico.

1.1. Caso de HD 172481

HD 172481 [α (2000) = $18^{\text{h}} 41^{\text{m}} 36^{\text{s}}$, 96, δ (2000) = $-27^{\circ} 57' 01''$, 25; $b = -10^{\circ}$, 37, $l = 6^{\circ}$, 72], es una estrella supergigante ubicada en la constelación de Sagitario. Según Reyniers y Van Winckel (2001), algunos de sus parámetros físicos fundamentales son: magnitud (V) = 9,09; temperatura efectiva (T_{eff}) = 7 250 K; y, gravedad superficial, $\log(g) = 1,5$. Se ha reportado su tipo espectral como F2Ia/ab, el cual fue derivado a través de espectros adquiridos con placas de prisma objetivo (MacConnell y col., 1976). Sin embargo, también, se cataloga a esta estrella como tipo F2/3Ia (Houk 1982).

La estrella HD 172481 pertenece a una importante, pero relativamente rara clase de estrellas post-AGB evolucionada a partir de una estrella de masa intermedia, y que presenta rasgos de Li I en sus espectros (Arellano y col., 2001; Reyniers y col., 2001, Giridhar y col., 2001). La intensidad del triplete de OI en el cercano infrarrojo a 7774 Å, que es un buen indicador de luminosidad, permitió que Giridhar et al. (2001) estimaran para esta estrella una alta luminosidad de $\log(L/L_{\odot}) \sim 4,5$. La temperatura efectiva determinada espectroscópicamente y la calibración de Schmidt – Kaler (1982), da un valor muy similar $\log(L/L_{\odot}) \sim 4,1$. Según Arellano et al. (2001), es una estrella moderadamente pobre en metales con $[\text{Fe}/\text{H}] = -0,55$, pero muestra un enriquecimiento significativo de elementos resultantes del proceso s indicando que ha pasado por el tercer dragado. Para esta estrella, Arellano y col., (2001) y Giridhar y col., (2001), encontraron una proporción de C/O $\sim 0,4$; por lo cual, el patrón de abundancia de HD 172481 y su aumento de Li, sustenta el escenario HBB que explica la escasez de estrellas ricas en carbono en la etapa AGB (Arellano y col., 2001, Giridhar y col., 2001).

Esta estrella tiene un fuerte flujo infrarrojo (IR) y por

consiguiente su distribución espectral de energía tiene una forma inusual con multi picos (Bogart, 1994), lo cual es un indicativo de la presencia de una concha de polvo circumestelar o de un disco (Reyniers y col., 2001). Sin lugar a dudas, se puede decir que HD 172481 es una estrella muy evolucionada ya que se identificaron líneas de C I y también Li I a 6708 Å en su espectro (Arellano et al., 2001).

Por otro lado, como se dijo anteriormente, la variación observada en las características de Li I en HD 172481, podría explicarse a través del el proceso HBB, pero también podría deberse a la presencia de una compañera, lo que hace de esta estrella una candidata potencial para la búsqueda de binaridad (Arellano y col., 2001). Hecho que fue comprobado por Reyniers y Van Winckel (2001) con la detección de una compañera luminosa roja, a partir de la distribución de energía espectral observada y la presencia de bandas de TiO en la porción roja de su espectro. Los mismos autores derivaron una relación de luminosidad de la compañera caliente tipo F (L_F) y de la compañera fría tipo M (L_M), obtenida a partir de un enrojecimiento $E(B - V) = 0,44$, que indica que la compañera también debe ser una estrella que ha evolucionado. El resultado obtenido es $L_F/L_M \sim 1,8$. Así, el sistema binario quedaría conformado por una estrella luminosa tipo F, en su etapa post-AGB; y, una compañera luminosa tipo M, probablemente evolucionando en la etapa AGB. La relación $L_F/L_M \sim 1,8$ fue derivada con una luminosidad total estimada de $L_F = 1,3 \times 10^5 L_\odot$ y asumiendo una distancia de 3,3 kpc (Molster y col., 1999). Ni el conjunto de datos fotométricos, ni el monitoreo de la velocidad radial realizada por Reyniers y Van Winckel (2001), muestran evidencia de variabilidad orbital lo cual puede indicar que el período es demasiado grande para la interacción binaria directa. A partir de todo esto, Reyniers y Van Winckel (2001) concluyeron, que la distribución espectral de energía de HD 172481 es originada por tres componentes: una componente luminosa tipo F que domina la parte UV y visible del espectro, una componente luminosa tipo M que se destaca en el cercano infrarrojo, y una envolvente de polvo frío que domina el flujo infrarrojo obtenido a partir de los datos proporcionados por el satélite IRAS (Infrared Astronomical Satellite).

Por otro lado, Whitelock y Marang (2001), aseveran que la compañera binaria de la estrella peculiar HD 172481, es una variable Mira que se encuentra en la punta de su etapa AGB y que tiene un periodo de pulsación de 312 días, cuyas características están dentro del rango normal encontrado para estrellas Miras solitarias. Aunque, su amplitud de pulsación y tasa de pérdida de masa ($\dot{M} \sim 3 \times 10^{-6} M_\odot/\text{año}$) son más altas que el promedio. Además, estos autores sugieren que la luminosidad derivada para la estrella supergigante tipo F ($L_F \sim 10^4 L_\odot$), es la que se esperaría para una estrella enana blanca ($\sim 0,6 M_\odot$) que se encuentra en una fase de quemado, en una concha de H que está siendo expulsado por su compañera.

Ahora bien, dado que la luminosidad estelar aumenta por factores grandes durante su evolución, siendo la luminosidad

típica para una estrella $3000 < L < 8000 L_\odot$, la mayoría de los sistemas binarios en los cuales una de las componentes está en la fase evolutiva post-AGB, son binarias espectroscópicas de una sola línea (SB1). Las binarias espectroscópicas de doble línea (SB2), son extremadamente raras puesto que consisten en dos objetos casi igualmente luminosos y, por tanto, casi igualmente evolucionados. Esto quiere decir que la masa inicial de ambas estrellas, debe haber sido extremadamente similar. Uno de estos raros casos de un sistema SB2 parece ser HD 172481 puesto que los espectros de esta estrella estudiados en investigaciones previas, muestran indicios de duplicidad en el centro de la línea. En el caso del estudio realizado por Arellano et al. (2001), las componentes no estaban bien separadas, por lo cual no pudieron decir con exactitud si las líneas se están dividiendo periódicamente para confirmar un sistema SB2 o si la emisión en el núcleo está haciendo que aparezca doble. Sin embargo, Reyniers y Van Winckel (2001), muestran en su trabajo un amplio análisis donde se confirma la naturaleza de HD 172481 como un sistema SB2.

Según Reyniers y Van Winckel (2001), HD 172481 es una estrella variable, tanto en magnitud como en velocidad radial, lo cual se puede apreciar claramente en la Fig. 1 de su trabajo. Donde se muestran variaciones de luz con una amplitud muy pequeña de $\pm 0,15$ mag (Van Winckel 1995); y, a pesar de que Reyniers y Van Winckel (2001), intentaron conseguir un período de pulsación u orbital, ninguno resultó convincente, en el sentido de que el ajuste a la curva de luz nunca fue satisfactorio. Sin embargo, dichos autores concluyeron que HD172481 es una estrella pulsante semi-regular que varía con una escala de tiempo de ~ 100 días. Se podría argumentar que la variabilidad en la fotometría es inducida por una contribución variable de la estrella compañera tipo M. Pero, al parecer, esta afirmación es muy poco probable ya que el filtro utilizado se encuentra en un rango ~ 549 nm, donde la contribución de la compañera fría sería despreciable ($\sim 10\%$) (Reyniers y Van Winckel (2001).

Existen pocos registros de estudios espectroscópicos para HD 172481; además, de pocos resultados de la velocidad radial, tanto para las líneas fotosféricas, como para las líneas de la serie de Balmer. Efectivamente, Reyniers y Van Winckel (2001), reportan valores de la velocidad radial obtenidos a partir de espectros de alta resolución (ver tabla 1). En dicho trabajo, se muestran además los valores de la velocidad radial de HD 172481, obtenidos a partir de varios espectros, utilizando el espectrómetro de velocidad radial CORAVEL, instalado en el telescopio danés de 1,5 m del Observatorio de La Silla, Chile. Dado que el espectro se correlaciona con una máscara de hardware de Arcturus (K2III), las mismas líneas siempre contribuyen a la determinación de la velocidad radial, representando de esta manera una muestra muy homogénea, logrando así tener una precisión de $\sim 0,5$ km/s. Además, obtuvieron algunos espectros de alta resolución con el espectrógrafo CORALIE del telescopio suizo Leonhard Euler de 1,2 m en el

mencionado observatorio.

Por otro lado, Arellano, et al. (2001) obtuvieron tres espectros de HD 172481. Uno de ellos en julio de 1999 con el telescopio de 1,93 m del Observatorio Haute – Provence equipado con el espectrógrafo echelle de alta resolución ELOIDE ($\sim 42\,000$). Los otros dos espectros, se consiguieron utilizando el espectrógrafo echelle 2d coudé, acoplado al telescopio de 2,7 m del Observatorio McDonald, Texas, Estados Unidos, el 13 de mayo de 2000, con una resolución de 30 000 y una amplia cobertura espectral $\lambda\lambda: 3\,900 - 10\,200\text{ \AA}$ (ver tabla 1).

Tabla 1. Valores de la velocidad radial para la estrella HD 172481 reportados en investigaciones previas

Fecha del espectro	($V_r \pm \sigma$) km/s	Referencia
6 Agosto, 1995	$-84,3 \pm 1,7$	Reyniers y Van Winckel (2001)
7 Agosto, 1995	$-85,8 \pm 1,6$	Reyniers y Van Winckel (2001)
6 Julio, 1997	$-84,7 \pm 2,3$	Reyniers y Van Winckel (2001)
30 September, 1998	$-85,6$	Reyniers y Van Winckel (2001)
Julio, 1999	$-73,1 \pm 1,8$	Arellano et al. (2001)
23 Marzo, 2000	$-82,2$	Reyniers y Van Winckel (2001)
13 mayo, 2000	$-84,4 \pm 2,1$	Arellano et al. (2001)

En la tabla 1, se puede apreciar claramente la variabilidad de la velocidad radial de esta estrella, además de la observada en la Fig. 1 del trabajo de Reyniers y Van Winckel (2001). Aunque de esta figura se deduce una amplitud pico a pico de 17 km/s, los autores no pudieron determinar una tendencia a largo plazo en los datos de velocidad radial que evidencien una interacción binaria directa. En su lugar, sostienen que esto podría ser un efecto de proyección, en el caso de que se estuviese viendo el sistema en una inclinación desfavorable, lo cual es probable debido al largo período orbital y de ahí la amplitud de velocidad tan pequeña. Suponiendo masas típicas para objetos post-AGB y AGB (tipo F: $0,6\,M_{\odot}$ y tipo M: $1,0\,M_{\odot}$), una inclinación de 60° y una amplitud de velocidad de 5 km/s, Reyniers y Van Winckel (2001), obtuvieron un período de 51 años. La muestra de velocidad radial indica un período orbital muy largo para esperar una interacción directa durante la evolución estelar.

Arellano, et al. (2001), observaron varias líneas de la serie de Balmer en todos sus espectros de HD 172481: la línea H γ muestra una absorción reducida y un posible desplazamiento hacia el rojo de la componente de emisión. Mientras que, H β tiene una amplia absorción y no hay la presencia de una componente de emisión. La línea H α tiene un perfil complejo

con una absorción profunda que tiene componentes de emisión en ambas alas, donde la componente de emisión azul es más fuerte que la roja. Según Reyniers y Van Winckel (2001), la línea H α presenta un perfil de tipo cáscara y un perfil de emisión que se encuentra en casi todas las otras estrellas candidatas post-AGB ópticamente brillantes (ver Fig. 6 en el trabajo de Reyniers y Van Winckel, 2001). Todavía no está del todo claro qué proceso es responsable de la emisión variable de H α en los espectros de estrellas post-AGB. Barthès y col., (2000), sugieren que la naturaleza de la pulsación irregular de la estrella brillante post-AGB probablemente se origina en la interacción entre la dinámica de la capa fotosférica y de la capa atmosférica superior. Aquí, las ondas de choque se generan cuando la capa fotosférica que retrocede, choca con la próxima y probablemente desempeñe un papel importante tanto en impulsar la pulsación como en limitar su amplitud.

Tanto la curva de luz como los datos de la velocidad radial que se muestran en los diferentes estudios, dan evidencia de la variabilidad compleja y no bien entendida de las capas atmosféricas observadas en la mayoría de las estrellas post-AGB lo cual se ve reforzado por la emisión variable de H α , que también presenta HD 172481.

2 Material Observacional

Se analizó un espectro de la estrella post-AGB HD 172481, el cual fue obtenido el 11 de agosto de 2003, utilizando un CCD (ChargeCoupledDevice) incorporado al espectrógrafo HERCULES (High Efficiency and Resolution Canterbury University Large Echelle Spectrograph), acoplado al telescopio reflector de 1-m Mclellan de tipo Cassegrain del Observatorio Mt John, de la Universidad de Canterbury (Nueva Zelanda), cuyas características están detalladas en Hearnshaw y col., (2002). Cubriendo un rango $\lambda\lambda \sim 4\,500 - 7\,080\text{ \AA}$, con una dispersión de $\sim 2\text{ \AA/mm}$. Utilizando subrutinas del software elaborado en la Universidad de Canterbury, se redujo el espectro de HD172481. A través de la curva de dispersión originada por el espectro de comparación de la lámpara de Th-Ar, se realizó la identificación de las líneas fotosféricas.

En las Fig. 1 y 2, se observan porciones del espectro bajo estudio de HD 172481.

3 Metodología

Para efectos de la selección e identificación de cada una de las líneas fotosféricas del espectro bajo estudio de la estrella HD 172481, se utilizaron los criterios que se describen a continuación.

3.1 Selección de las líneas espectrales

Mediante el uso de algunas sub-rutinas del software de reducción IRAF, se obtuvo por aproximación gaussiana la longitud de onda asociada a cada línea en el espectro de HD 172481.

El proceso de selección de las líneas fotosféricas se realizó basado en los siguientes criterios estándares:

- i. La profundidad del centro de la línea, debe ser por lo menos 10% del continuo local, para no ser catalogada como ruido.
- ii. Debe existir una simetría en el perfil de la línea.
- iii. El perfil de la línea debe contener el mínimo de ruido o de interferencia posible y no debe estar contaminado por el perfil de otras líneas espectrales.
- iv. El ancho de la línea debe ser comparable con el ancho que presentan la mayoría de las líneas del espectro.

En líneas generales, a medida que el espectro sea más ruidoso, es necesario seleccionar las líneas más fuertes para el cálculo de la velocidad radial. Así que, como buena aproximación, una línea cuyo centro esté a 3-sigma por debajo del continuo, asegura una buena selección de la misma. (Rosenzweig y col., 2016). Este proceso de selección de las líneas fotosféricas, es un proceso arduo y debe ser realizado con mucho cuidado para evitar errores que repercuten en el cálculo de la velocidad radial de la estrella.

Luego de seleccionar las líneas tomando en cuenta los criterios antes mencionados y haciendo uso de la tabla de Multipletes de Moore (1972), se identificaron tanto las especies atómicas, como el multiplete y la longitud de onda en reposo de cada línea.

3.2 Cálculo de la velocidad radial

La velocidad radial es uno de los parámetros más importantes que caracteriza a las estrellas; pequeñas variaciones de la velocidad radial son indicadores del estado físico interior de la estrella. Esto es, las variaciones de la velocidad radial de una estrella, indican turbulencia o microturbulencia en su atmósfera. En el presente trabajo, se aplicó el efecto Doppler a cada una de las líneas espectrales seleccionadas para determinar su velocidad radial y luego se sumó algebraicamente, de manera individual, una corrección baricéntrica. Para así, una vez obtenida la velocidad radial de cada línea fotosférica, calcular el valor promedio de este parámetro para la estrella HD 172481.

Dada la naturaleza de inestabilidad de las estrellas supergigantes, el cálculo de las velocidades radiales de las líneas fotosféricas y de las líneas de la serie de Balmer, se realizó por separado.

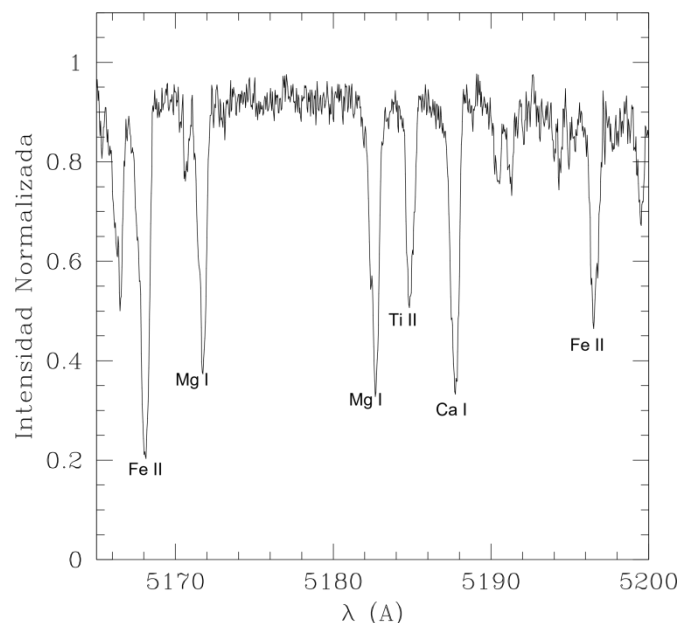


Figura 1. Parte del espectro analizado en el presente estudio de la estrella HD 172481.

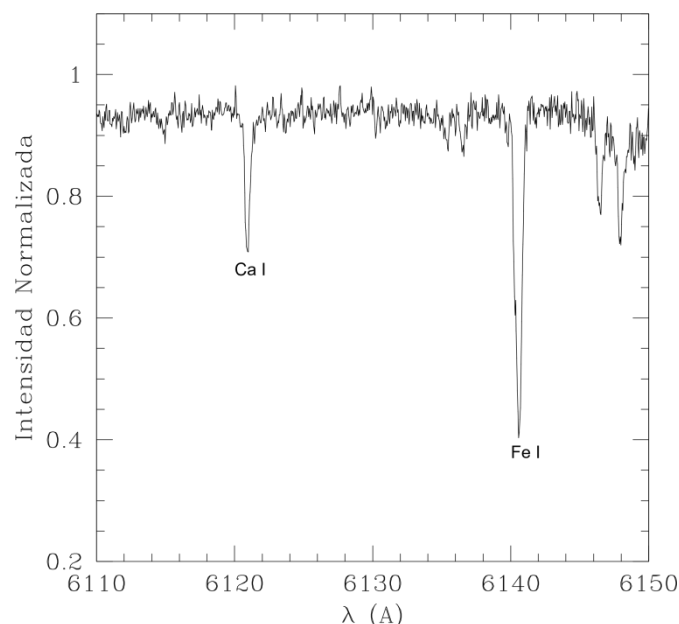


Figura 2. Parte del espectro analizado en el presente estudio de la estrella HD 172481.

4 Análisis de los Resultados

4.1 Velocidad radial para las líneas fotosféricas de la estrella HD 172481

Siguiendo la metodología descrita en la sección anterior, se identificó un total de 86 líneas fotosféricas para el espectro de HD 172481. Los elementos más abundantes identificados son: Fe I (21%), Fe II (18%), Ti II (17%), Cr II (7%), los demás elementos se encontraron en proporciones mucho

menores.

A las 86 líneas en absorción estudiadas, se aplicó una corrección baricéntrica de $-19,1$ km/s, sumando este valor de manera individual a la velocidad radial obtenida para cada una de ellas. Obteniéndose posteriormente la velocidad radial promedio del espectro, así como su desviación estándar, arrojando un valor de $-83,1 \pm 0,6$ km/s. Para el cálculo de la velocidad radial promedio de las líneas fotosféricas del espectro, no se tomaron en cuenta las líneas $H\alpha$ y $H\beta$ que, por su naturaleza, fueron tratadas por separado.

El valor calculado de la velocidad radial de la estrella HD 172481 obtenido en el presente estudio, se encuentra en el rango de valores de velocidades radiales reportadas anteriormente (Reyniers y col., 2001, Arellano y col., 2001). Además, al comparar dicho valor con los valores que se muestran en la tabla 1, se puede observar que es un aporte más a la evidencia de variabilidad de la velocidad radial de esta estrella.

La lista completa de líneas fotosféricas identificadas, con sus respectivas velocidades radiales, está a la disposición de cualquier persona interesada, contactando a alguno de los autores del presente trabajo.

4.2 Velocidad radial de las líneas de la serie de Balmer de la estrella HD 172481

Las líneas de la serie de Balmer, son líneas de resonancia que se forman en la parte superior de la atmósfera estelar; por lo tanto, son más susceptibles a cambios violentos en la atmósfera de la estrella. Esto ocasiona que sus velocidades radiales sean diferentes a la velocidad radial que se obtenga de las líneas fotosféricas; razón por lo cual, el cálculo de la velocidad radial asociada a estas líneas se realizó de manera independiente al de las líneas fotosféricas.

En el rango espectral estudiado, se encontraron solo dos líneas de dicha serie, $H\alpha$ y $H\beta$ (Fig. 3 y 4). Las velocidades radiales obtenidas para las líneas $H\alpha$ y $H\beta$, son $-71,9$ km/s y $-69,8$ km/s, respectivamente. Las demás las líneas de la serie de Balmer están en la ranura de la rendija de HERCULES, por lo que no pudieron ser estudiadas.

Las líneas no muestran un perfil P-Cygni; pero, mientras $H\beta$ está en completa absorción (Fig. 4), $H\alpha$ muestra la parte central en absorción y las componentes azul y roja en emisión, siendo la componente azul más intensa que la componente roja (Fig. 3). Esto se ajusta perfectamente a las observaciones realizadas por Arellano y col., (2001) y Reyniers y col., (2001) sobre el perfil de la línea $H\alpha$ de esta estrella. Al observar los perfiles reportados por estos autores para esta línea, se puede notar que la componente azul obtenida en el espectro analizado en el presente estudio, es más intensa en su flujo que la obtenida en su espectro del 23 de marzo de 2000. Así, tomando en cuenta estos resultados y

lo observado en la Fig. 3, podemos ver como en un periodo de aproximadamente ocho años, la componente azul de la línea $H\alpha$ de la estrella HD 172481, se ha intensificado de manera sistemática.

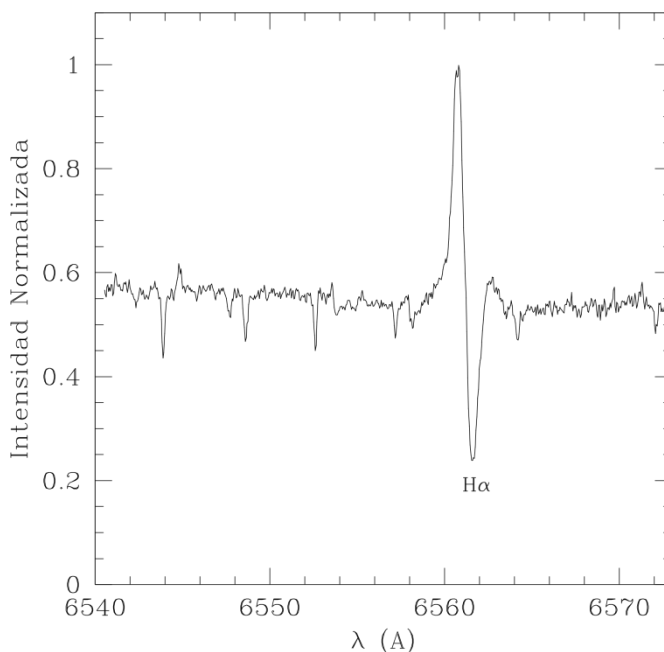


Figura 3: Línea $H\alpha$ de la estrella HD 172481, presente en el espectro bajo estudio.

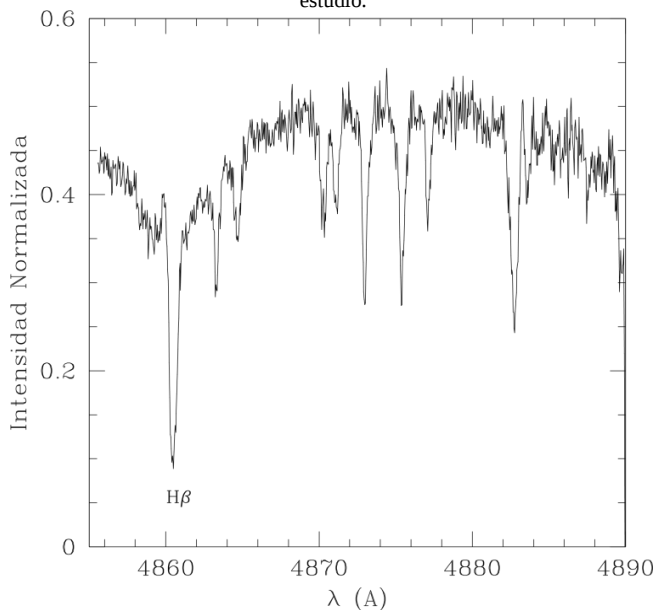


Figura 4: Línea $H\beta$ de la estrella HD 172481, presente en el espectro bajo estudio.

4.3 Comparación del perfil de la línea $H\alpha$ de la estrella HD 172481 con el de otras estrellas similares

En la Fig. 5, se muestran espectros de distintas estrellas que

fueron obtenidos con los equipos y el telescopio descritos en la sección 2; por lo que, las porciones del espectro graficadas en la mencionada figura, se correlacionan muy bien entre sí.

Estos resultados fueron obtenidos por Rosenzweig y col., (2012) (HD 161471), Rosenzweig y col., (2016) (HD 114855 y HD133656) y Guzmán et al. (2008) (HD 74180). Para el caso de HD 172481, se presenta el perfil de la línea H α reportado en la Fig. 3 del presente trabajo, pero con una escala adecuada para poder visualizar las diferencias que existen para el caso particular de esta línea de las diversas estrellas mencionadas.

En la Fig. 5 se evidencia que la línea H α , al igual que otras líneas de la serie de Balmer, es muy susceptible a los movimientos turbulentos presentes en estrellas que se encuentran en la etapa Post-AGB o próximas a esta etapa evolutiva. Además de los trabajos de Guzmán y col., (2008), Rosenzweig y col., (2012, 2016), otros importantes resultados para estas estrellas fueron reportados por Sowell (1990), Walker y col., (1988), Giridhar y col., (2010), van Winckel y col., (1996), Stencel y col., (1989) y Jones y col., (1993). En ellos se explica que, en la mayoría de los casos, el comportamiento del perfil de la línea H α se debe a la naturaleza pulsante de estas estrellas, que en su mayoría tienen un exceso de radiación infrarroja debido a una capa circumestelar de polvo, producida por la eyección de material proveniente de la superficie estelar y ocasionada por la turbulencia de las pulsaciones de la estrella.

Es relevante reportar resultados específicos de las líneas de resonancia, como por ejemplo el caso de la línea H α ; ya que ratifican que su velocidad radial no puede, ni debe ser tomada en cuenta al momento de derivar la velocidad radial de la estrella.

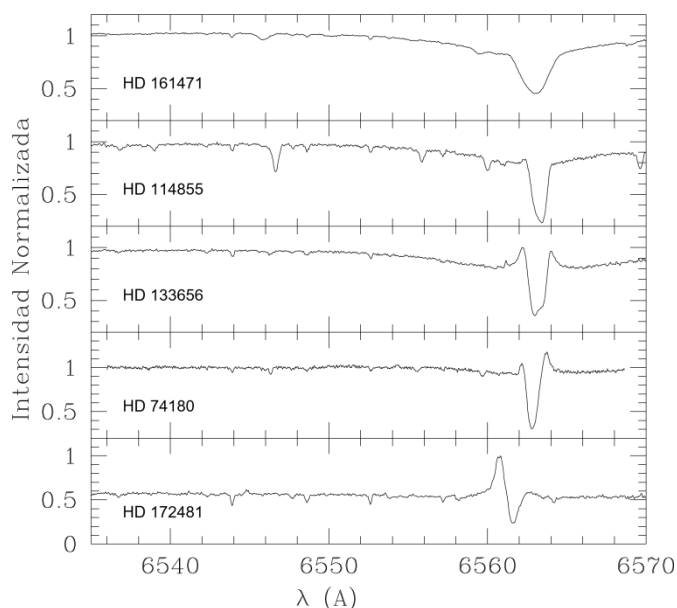


Figura 5: Línea H α de estrellas similares a HD 172481.

5 Conclusiones

Con un riguroso análisis llevado a cabo para el espectro de HD 172481, se identificaron 86 líneas fotosféricas. La velocidad radial promedio de dichas líneas es $(-83,1 \pm 0,6)$ km/s. Este valor se encuentra dentro del rango de valores reportados por Reyniers y col., (2001) y Arellano, y col., (2001), donde se reporta que esta estrella presenta una variabilidad tanto en la fotometría como en el valor de la velocidad radial.

Las velocidades radiales de las líneas H α y H β de la serie de Balmer arrojan valores de $-71,9$ km/s y $-69,8$ km/s, respectivamente. No se encontraron líneas con perfil P-Cygni, ni en emisión; salvo la línea H α que muestra una fuerte absorción en su parte central y simultáneamente, tiene componentes de emisión azul y roja, siendo la más intensa la componente azul. Lo cual está en concordancia con las observaciones previas realizadas sobre el perfil de esta línea. Además, la componente azul de la línea H α de esta estrella, obtenida en el espectro analizado en el presente estudio, es más intensa en su flujo que la obtenida en trabajos anteriores. La presencia de estas emisiones y la absorción en la parte central de la línea, son características comunes en estrellas que se encuentran en la etapa post-AGB. La línea H β se encuentra en completa absorción. La diferencia de valores entre la velocidad radial de las líneas de la serie de Balmer, comparada con la velocidad radial promedio de las líneas fotosféricas, evidencia la existencia de movimientos turbulentos en la atmósfera de la estrella.

Si bien no se toman en cuenta a las líneas de resonancia para el cálculo de la velocidad radial de la estrella, el estudio de las mismas, en especial las líneas de la serie de Balmer, nos puede brindar información importante sobre el comportamiento complejo y no bien entendido de las capas de la atmósfera de las estrellas post-AGB, como es el caso de HD 172481. Tal es el caso en el que el perfil de la línea H α muestra una emisión variable.

Finalmente, los elementos químicos más abundantes encontrados en el espectro de HD 172481 son típicos de las estrellas en esta etapa evolutiva; esto es: Fe I (21%), Fe II (18%), Ti II (17%), Cr II (7%), además de las líneas de Balmer H α y H β . La lista de las líneas fotosféricas identificadas, está a la disposición por vía electrónica.

6 Referencias

- Arellano A, Giridhar S, Mathias P, 2001, Atmospheric abundances in post-AGB candidates of intermediate temperature, *A&A*, 368, pp. 250-266.
 Barthès D, Lèbre A, Gillet D, Mauron N, 2000, On the nature of the pulsation of the post-AGB star HD 56126, *A&A*, 359,

pp. 168-180.

Bogart E, 1994, Ph.D. Thesis, Katholieke Uni. Leuven, Holanda.

Busso M, Gallino R, Wasserburg GJ, 1999, Nucleosynthesis in Asymptotic Giant Branch Stars: Relevance for Galactic Enrichment and Solar System Formation, *ARA&A*, 37, pp. 239-309.

García G, Díaz F, Porras L, Barillas O, Rosenzweig P, Guzmán E, Steinhauer A, Hearnshaw J, Pooley D, 2003, Análisis de Observaciones Espectroscópicas Recientes de dos Estrellas Supergigantes. *Revista Mexicana de Física*, 49(2), pp. 75-77.

Giridhar S, Arellano Ferro A, Mathias P, 2001, A Li-rich post-AGB star HD 172481, *Bulletin of the Astronomical Society of India*, Vol. 29, pp. 289-293.

Giridhar S, Molina R, Arellano Ferro A, Selvakumar G, 2010, Chemical composition of A-F type post-AGB candidates, *MNRAS*, 406, pp. 290-306.

Guzmán E, Rosenzweig P, Castillo A, Rodríguez R, Hearnshaw J, Pooley D, 2008, Determinación de la Velocidad Radial de dos Estrellas Supergigantes (HR 4912 y HD 74180), *Revista Ciencia*, 16(2), pp. 186-194.

Hearnshaw JB, Barnes SI, Kershaw GM, Frost N, Graham G, Ritchie R, Nankivell GR, 2002, The Hercules Échelle Spectrograph at Mt. John. *Experimental Astron*, 13, pp. 59-76.

Houk N, 1982, Michigan Catalogue of Two-dimensional Spectral Types for the HD stars, Volume 3, Ann Arbor, MI (USA): Department of Astronomy, University of Michigan.

Jones TJ, Humphreys RM, Gehrz RD, Lawrence G, et al., 1993, IRC +10420 - A cool hypergiant near the top of the H-R diagram, *ApJ*, 411, pp. 323-335.

Karttunen H, Kröger P, Oja H, Poutanen M, Donner KJ (Eds.), 2006, *Fundamental Astronomy* (5th ed.), Springer Berlin Heidelberg, USA: New York.

Lattanzio JC, 1997, En el 2nd Oak Ridge Symposium on Atomic and Nuclear Astrophysics (IOP Publishing Ltd.).

MacConnell DJ y Bidelman WP, 1976, Finding list and spectral classifications for southern luminous stars, *AJ*, 81(4), pp. 225-227.

Molster FJ, Waters LBFM, Trams NR, Van Winckel H, Decin L, van Loon JTh, Jäger C, Henning Th, Käufel HU, de Koter A, Bouwman J, 1999, The composition and nature of the dust shell surrounding the binary AFGL 4106, *A&A*, 350, pp. 163-180.

Mowlavi N, 1999, Dredge-Up in Asymptotic Giant Branch Stars, *New Astr. Rev*, 43(6-7), pp. 389-402.

Moore C, 1972, A Multiplet Table of Astrophysical Interest, Revised Edition. Washington, USA: NSRDS.

Porras L, Rosenzweig P, Guzmán E, Hearnshaw J, Steinhauer A, 2004, Análisis de las Condiciones Atmosféricas de dos Estrellas Supergigantes, *Revista Ciencia*, 12, pp. 185-188.

Reyniers M, Van Winckel H, 2001, HD172481: A super lithium-rich metal-deficient post-AGB binary with a red AGB companion, *A&A*, 365, pp. 465-475.

Rosenzweig P, Guzmán E, Naranjo O, 1997, Spectral Analysis of the Supergiant HD101584, *Journal of the Royal*

Astronomical Society of Canada, 91, pp. 255-260.

Rosenzweig P, García G, Peña L, Burgos J, Hearnshaw J, 2012, Análisis de Observaciones Espectroscópicas de dos Estrellas Supergigantes (HD 161471 y HD 54605): Determinación de la Velocidad Radial, *Revista Ciencia*, 20(4), pp. 237-243.

Rosenzweig P, García Lugo G, Meléndez JA, Useche W, Celis MT, Pooley D, 2016, Análisis de observaciones espectroscópicas de dos estrellas post-AGB: Determinación de la velocidad radial, *Revista Ciencia*, 24(2), pp. 95-103.

Schmidt-Kaler Th, 1982, En *Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*, ed. K. Schaifers, & H. H. Vogt (Springer-Verlag).

Schwarzschild M, Härm R, 1965, Thermal Instability in Non-Degenerate Stars, *ApJ*, 142, pp. 855-867.

Sowell JR, 1990, A survey of Balmer-line profiles and IRAS fluxes in forty yellow supergiants, *AJ*, 100, pp. 834-848.

Stencel RE, Pesce JE y Bauer WH, 1989, Infrared circumstellar shells - Origins, and clues to the evolution of massive stars, *AJ*, 97, pp. 1120-1138.

Van Winckel H, 1995, Ph.D. Thesis, Katholieke Univ. Leuven, Holanda.

Van Winckel H, Oudmaijer R, Trams N, 1996, HD 133656: a new high-latitude supergiant, *A&A*, 312, pp. 553-559.

Van Winckel H, 2003, Post-AGB Stars, *ARA&A*, 41, pp. 391-427.

Walker HJ, Wolstencroft RD, 1988, Cool circumstellar matter around nearby main-sequence stars, *PASP*, 100, pp. 1509-1521.

Wallerstein G, Iben I. Jr, Parker P, Boesgaard AM, Hale GM, Champagne AE, Barnes CA, Käppeler F, Smith VV, Hoffman RD, Timmes FX, Sneden C, Boyd RN, Meyer BS, Lambert DL, 1997, Synthesis of the elements in stars: forty years of progress, *Rev. Mod. Phys*, 69, pp. 995-1084.

Weigert A, 1966, Sternentwicklung VI: Entwicklung mit Neutrinoverlusten und thermische Pulse der Helium-Schalenquelle bei einem Stern von 5 Sonnenmassen, *Zeitschrift für Astrophysik*, 64, pp. 395-425.

Whitelock P, Marang F, 2001, An Extremely Slow Nova? *MNRAS*, 323, L13-L16.

Recibido: 13 de noviembre de 2016

Aceptado: 05 de mayo de 2017

Rosenzweig L., Patricia: Licenciada en Física, Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias, Mérida, Venezuela. Magister of Science y Philosophical Doctor in Physics (PhD), ambos títulos en The University of Toledo, Department of Physics y Astronomy, Toledo, Ohio, USA. Miembro del Comité Científico Internacional de REDALYC. Miembro correspondiente de la Academia de Mérida. Profesora Titular del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

García Lugo Gabriela, Magister Scientiae en Física Fundamental. Profesora e Investigadora de la Facultad de Ciencias de la ULA, Grupo de Astrofísica Teórica, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: gabysa24@gmail.com

Pérez Carlos, Licenciado en Física, 2017, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: enrique parra8@gmail.com

Pooley Dan, Ph.D. en Física en The University of Canterbury, New Zealand. Profesor y tutor en Notting Hill Tutors, David Game College, Londres, Inglaterra. Correo electrónico: daniel_pooley58@yahoo.com.au

