

Determinación de la velocidad radial de dos estrellas supergigantes

Determination of the radial velocity of two supergiant stars

García Lugo, Gabriela¹; Rosenzweig Levy, Patricia^{1*}; Paredes, Ender¹; Pérez, Carlos¹;
Céspedes, María¹; Rodríguez, Armando²; Celis, María -Teresa³

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

²Departamento de Cálculo, Escuela Básica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

³Lab. de Polímeros y Colides (POLYCOL) Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

*meridapatricia20@gmail.com

Resumen

En el presente estudio, se analizaron dos espectros de alta resolución de dos estrellas supergigantes, HD 159378 y HD 75276. Estos espectros fueron obtenidos en el año 2003, utilizando un CCD incorporado al espectrógrafo HERCULES, acoplado al telescopio tipo Cassegrain McLellan, de 1 m del Observatorio Mt. John de la Universidad de Canterbury (Nueva Zelanda). Ambos cubren el rango $\lambda\lambda \sim 4.500 - 7.080 \text{ \AA}$, $R = 41.000$, con una dispersión lineal de 2 \AA/mm , y fraccionados en 44 y 46 órdenes, respectivamente. Para el análisis de los espectros, se realizó la calibración de la longitud de onda con una lámpara de comparación de Th-Ar. Utilizando las subrutinas del software IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) y siguiendo criterios estándares de selección, se identificaron 38 y 146 líneas fotosféricas para HD 159378 y HD 75276, respectivamente. Aplicando el Efecto Doppler, se derivó la velocidad radial promedio para cada una de las estrellas con su respectiva corrección bariocéntrica, obteniendo el valor de $(- 14,6 \pm 0,6) \text{ km/s}$ y $(24,0 \pm 0,4) \text{ km/s}$, para HD 159378 y HD 75276, respectivamente. Además de las líneas fotosféricas, fue posible la identificación de algunas de las líneas de la Serie de Balmer; en el caso de HD 159378, se identificó la línea H α obteniendo el valor para su velocidad radial de $- 5,1 \text{ km/s}$. Por otro parte, para HD 75276, se pudo observar la línea H β , cuyo valor calculado de la velocidad radial fue de $- 24,2 \text{ km/s}$; destacando el hecho de que es la primera vez que se realiza un análisis de alguna de las líneas de la Serie de Balmer para esta estrella y se calcula su velocidad radial. En el rango de los dos espectros analizados, no se encontraron líneas en emisión o con perfil P-Cygni.

Palabras clave: Velocidad radial, estrellas supergigantes, líneas fotosféricas, espectroscopia.

Abstract

In the present study, two high-resolution spectra of two supergiant stars, HD 159378 and HD 75276, were analyzed. These spectra were obtained in 2003, using a CCD incorporated into the HERCULES spectrograph, coupled to the 1 m Cassegrain McLellan telescope, from the Mt. John Observatory of the University of Canterbury (New Zealand). Both cover the range $\lambda\lambda \sim 4,500 - 7,080 \text{ \AA}$, $R = 41,000$, with a linear dispersion of 2 \AA/mm , and fractionated into 44 and 46 orders, respectively. For the spectral analysis, the wavelength calibration was performed with a Th-Ar comparison lamp. Using the IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) software subroutines and following standard selection criteria, 38 and 146 photospheric lines were identified for HD 159378 and HD 75276, respectively. Applying the Doppler Effect, the average radial velocity was derived for each of the stars with their respective barycentric correction, obtaining the value of $(- 14.6 \pm 0.6) \text{ km/s}$ and $(24.0 \pm 0.4) \text{ km/s}$, for HD 159378 and HD 75276, respectively. In addition to the photospheric lines, it was also possible to identify some of the lines of the Balmer Series; In the case of HD 159378, the H α line was identified, obtaining a radial velocity of $- 5.1 \text{ km/s}$. On the other hand, for HD 75276, H β line could be observed, with a calculated value of the radial velocity of $- 24.2 \text{ km/s}$; highlighting the fact that it is the first time that an analysis of any of the lines of the Balmer Series has been carried out for this star and its radial velocity has been calculated. In the range of the two analyzed spectra, no lines in emission or P-Cygni profiles were found.

Key words: Radial velocity, supergiant stars, photospheric lines, spectroscopy.

1 Introducción

Las estrellas supergigantes son objetos celestes interesantes debido a que, entre otras razones, son escasas, muy brillantes, inestables y presentan algunas peculiaridades en sus espectros. La escasez de este tipo de estrellas se debe a que, son estrellas muy masivas, que han evolucionado desde la Secuencia Principal durante un tiempo de entre diez y cien millones de años. De modo que, no es difícil imaginar, que representa una tarea ardua para la naturaleza, el formar estrellas en estas condiciones; ya que, por cada millón de estrellas con masa solar, se podría tener solo un centenar de estrellas con 10 veces la masa del Sol, capaces de convertirse en estrellas supergigantes.

Ahora bien, de acuerdo con su ubicación en el Diagrama HR, estos objetos pueden pertenecer a todas las clases espectrales y, por ende, a todo el rango de temperaturas. En el caso de las supergigantes anaranjadas o rojas, su temperatura superficial es baja, pero poseen gran brillo intrínseco debido a su gran tamaño; al contrario de las supergigantes azules, cuya temperatura superficial es extremadamente alta y pueden llegar a alcanzar luminosidades entre 10^4 y $10^6 L_{\odot}$ (Garzón y col. 2009).

En términos generales, las estrellas supergigantes de tipo espectral temprano (B, A y F), comúnmente muestran líneas espectrales mucho más estrechas y profundas que las líneas espectrales correspondientes a las estrellas de la Secuencia Principal, gigantes y enanas blancas; por el contrario, las líneas de la Serie de Balmer aparecen excepcionalmente anchas en los espectros de las estrellas B, A y F. En cuanto a las supergigantes tardías (G, K y M), éstas muestran líneas espectrales pertenecientes a ciertos metales, las cuales son relativamente más fuertes que las líneas metálicas presentes en las estrellas de la Secuencia Principal, gigantes y enanas blancas. Además, en los espectros de las supergigantes tardías aparecen bandas moleculares tales como TiO, CO, entre otras.

Por otro lado, para estas estrellas, tanto los rangos de luminosidad como de temperatura efectiva, son claros indicadores de que se encuentran en una fase tardía de su evolución, en alguna etapa posterior al agotamiento del hidrógeno. Esto las hace muy inestables ya que se encuentran en una etapa próxima a convertirse en supernovas. Estas características ocasionan que, todas las estrellas supergigantes presenten variabilidades que afectan sus parámetros fundamentales, entre los que se encuentra la velocidad radial (según las referencias en Rosenzweig y col. 2012).

Más aun, derivar los parámetros físicos de las estrellas supergigantes, a través de la comparación de las observaciones con los resultados obtenidos de los modelos teóricos de atmósferas estelares, no es una tarea obvia. Esto se debe a que los modelos teóricos de atmósferas estelares,

usualmente utilizan suposiciones estándares; tales como, las ecuaciones de Saha – Boltzman, la aproximación de capas plano-paralelas y el equilibrio térmico local (ETL). Suposiciones que, por lo general, son válidas para las estrellas de la Secuencia Principal. Sin embargo, algunas dificultades se presentan a la hora de realizar un análisis completo del modelaje de las atmósferas estelares de las estrellas supergigantes, motivado a que: (a) las atmósferas de las estrellas están en expansión como consecuencia de sus gravedades superficiales muy bajas, por lo que, la aproximación plano paralela deja de ser válida; (b) la atmósfera extendida conduce a grandes movimientos turbulentos, debido a que la convección, además de la radiación, comienza a ser un importante mecanismo de transporte de energía; (c) el alejamiento del equilibrio térmico local (ETL), la pérdida eventual de masa y las inestabilidades, debido a su estado tardío de evolución, complican el escenario; (d) los vientos estelares y las inestabilidades en las atmósferas de la estrellas, podrían dar origen a líneas de emisión, perfiles P-Cygni o líneas prohibidas (Gray y col. 2001).

En el presente trabajo, se analizaron espectros de alta resolución de dos estrellas supergigantes, HD 159378 y HD 75276, con el propósito de contribuir a la comprensión de este tipo de estrellas, a través del cálculo y análisis de uno de sus parámetros físicos fundamentales, como lo es la velocidad radial. Este estudio también tiene la finalidad, de aportar nuevos resultados a la base de datos de velocidades radiales de estrellas supergigantes y estrellas post-AGB, como parte de una amplia investigación llevada a cabo por el Grupo de Astrofísica Teórica, de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes (Rosenzweig Levy y col. 2017).

1.1. La estrella supergigante HD 159378

La estrella HD 159378, es una estrella supergigante amarilla, de tipo espectral G3 Ia-Iab. Está ubicada en los bordes de la constelación de Escorpio, y sus Coordenadas Ecuatoriales y Galácticas son: [α (2000) = $17^{\text{h}} 35^{\text{m}} 56^{\text{s}},35$; δ (2000) = $-33^{\circ}25'56''$,58; $l = 355^{\circ},09$, $b = -0^{\circ},062$] (Brown et al, 2021), respectivamente. Para esta estrella, Kipper (2008) reporta algunos de sus parámetros físicos fundamentales, siendo la magnitud aparente $V = 8,58$ mag, su gravedad superficial $\log(g) = 1$ y su temperatura efectiva $T_{\text{eff}} = 7.500$ K. En lo referente a su edad, Massey et al. (2001) estimaron un valor de unos 10 millones de años y su masa entre 15 y 25 M_{\odot} , basado en su posición en el borde azul brillante de la franja de inestabilidad del Diagrama HR.

Por otro lado, según Kipper (2008), es el miembro 102 del cúmulo abierto Trumpler 27 y se encuentra a unos 7' del centro estimado del cúmulo. Del mismo modo, Moffat et al.

(1977), reportan que la estrella se encuentra a una distancia $d = (2,1 \pm 0,2)$ kpc del centro de Trumpler 27 y está en el camino evolutivo de convertirse en una estrella Cefeida.

Ahora bien, con respecto a la velocidad radial de HD 159378, se han realizado cuatro estudios sobre este parámetro. El primer estudio, fue realizado por Balona (1982), y las velocidades radiales reportadas fueron calculadas con espectros obtenidos con el espectrómetro fotoeléctrico adjunto al codo de enfoque del reflector de 1,88 m de la Estación Sutherland del Observatorio Astronómico Sudafricano. En el trabajo de Balona (1982), se seleccionaron 25 líneas fotosféricas y se calcularon las velocidades radiales, hallando valores entre - 6,5 km/s y - 26,6 km/s, obteniendo una velocidad radial promedio (- 15,8 \pm 1,3) km/s.

Por otro lado, Kipper (2008) estudió la atmósfera de la supergigante HD 159378, a partir del análisis de un espectro de alta resolución proveniente de la base de datos ELODIE, archivado en el Observatorio de *Haute-Provence* (Francia). Las mediciones del espectro fueron realizadas con el sistema de análisis y reducción de datos IRAF, cubriendo un rango de (515 – 646) nm. El valor reportado de la velocidad radial, fue (- 14,7 \pm 1,7) km/s, el cual fue calculado a partir de 76 líneas seleccionadas. Las velocidades microturbulentas reportadas para las líneas de Fe I y Fe II, son algo diferentes al promedio, con valores entre - 8 y - 9 km/s, respectivamente. Según Kipper (2008), la abundancia derivada podría estar relacionada con el hecho de que la atmósfera de HD159378 no es estática.

De igual modo, Mermilliod et al. (2008) reportan un valor de la velocidad radial (- 16,72 \pm 0,3) km/s, a partir de espectros obtenidos con los espectrómetros fotoeléctricos de correlación cruzada, operado con el telescopio suizo de 1 m del Observatorio de *Haute-Provence* en Francia, y el telescopio danés de 1,5 m en el *European Southern Observatory* (ESO), en La Silla, Chile.

Finalmente, el valor de la velocidad radial reportado por Brown et al. (2021), fue (- 15,58 \pm 1,02) km/s. Dicho valor se calculó a partir de medidas fotométricas recopiladas durante un período de unos 670 días de operaciones de la misión de la Sonda Espacial Gaia. Un resumen de los valores previamente reportados de la velocidad radial de HD 159378, se puede observar en la Tabla 1.

1.2. La estrella supergigante HD 75276

La estrella HD 75276, se encuentra ubicada en la región de la Nube de Magallanes; siendo sus Coordenadas Ecuatoriales y Galácticas: [α (2000) = 08^h 47^m 18,85^s; δ (2000) = - 46°09'19,49"; $l = 265^{\circ},01$; $b = - 01^{\circ},74$] (Brown et al, 2021), respectivamente. Pertenece al tipo espectral F0 Ib y tiene una magnitud $V = 5,76$ mag (Humphreys, 1970). Algunos de sus parámetros físicos fundamentales fueron determinados por Barbuy et al. (1996), quienes obtuvieron una temperatura efectiva $T_{\text{eff}} = (7.050 - 7.059)$ K; su gravedad superficial $\log(g) = 0,5 - 1,50$; y, masa 29,9 M_{\odot} . Además,

Barbuy et al. (1996) también reportan que la metalicidad [Fe/H] de HD 75276 varía con un rango de - 0,30 – 0,00 dex; mientras que Usenko et al. (2011), hallaron un valor de metalicidad muy cercano a este rango, [Fe/H] = - 0,07 dex.

Sin embargo, en cuanto a las abundancias de carbono y nitrógeno con respecto al hierro, los resultados de ambos autores difieren mucho. Por una parte, Barbuy et al. (1996) encontraron que [C/Fe] = 0,0 dex y [O/Fe] = - 0,2 dex, respectivamente; mientras que, los resultados de Usenko et al. (2011), son [C/Fe] = - 0,33 dex y [O/Fe] = - 0,03 dex. Por lo que esta estrella muestra una abundancia similar a una Cefeida Clásica, luego de que ocurre el primer dragado. Es decir, es similar a las estrellas jóvenes de población I, ubicadas en la rama de las estrellas supergigantes, aun cuando su T_{eff} es ligeramente más elevada.

En cuanto a su velocidad radial, se han realizado tres estudios previos para la estrella HD 75276. El más reciente fue el de Usenko et al. (2011), cuyos datos fueron obtenidos en el Observatorio Astronómico de Sudáfrica (SAAO), haciendo uso de una fibra óptica de 50 μm de diámetro y un prisma optimizado para el azul, en un rango de (3.770 – 5.560) Å; y para el rojo, en un rango espectral de (5.200 – 10.400) Å. El detector utilizado fue una cámara CCD TEK6 de 1.024 x 1.024 píxeles, del espectrógrafo echelle GIRAFFE (*Grating Instrument for Radiation Analysis with a Fiber Fed Echelle*), acoplado al foco Coudé del telescopio de 1,9 m. A partir de estos espectros, obtuvieron la velocidad radial de la estrella HD 75276, reportando un valor de (21,99 \pm 0,38) km/s.

Por otro lado, el *General Catalogue of Stellar Radial Velocities*, reporta un valor para la velocidad radial de esta estrella de 32 km/s, que fue calculado a partir de observaciones realizadas en el Observatorio de *Mount Wilson* (Wilson, 1953). Dicho observatorio, cuenta con dos telescopios; el de Hooker y el reflector, cuyos espejos tienen un diámetro de 254 cm y 150 cm, respectivamente.

Finalmente, el catálogo CRVAD-2, publicado en el año 2007, es considerado una fusión de la lista de estrellas del catálogo ASCC-2.5, el Catálogo General de Velocidades Radiales (GCRV, Cat. III/213) y otras listas y catálogos de velocidades radiales publicados recientemente. Por ello, el valor reportado para la velocidad radial de HD 75276 en este catálogo, tiene el mismo valor reportado por Wilson en 1953 (Kharchenko y col. 2007).

En la Tabla 1, se muestran los valores conocidos de la velocidad radial de HD 75276.

2 Material Observacional

Se analizaron dos espectros de alta resolución de dos estrellas supergigantes. El espectro analizado de HD 159378, fue obtenido el 9 de agosto de 2003; mientras que,

el de HD 75276 se obtuvo en enero de ese mismo año. Para obtener los espectros, se realizaron observaciones espectroscópicas de alta resolución, utilizando un CCD instalado en el espectrógrafo HERCULES, acoplado al telescopio tipo *Cassegrain McLellan* de 1m del Observatorio *Mt. John* de la Universidad de *Canterbury* (Nueva Zelanda). Los espectros fueron reducidos con el Software de reducción HERCULES (HRSP), desarrollado en el Departamento de Física y Astronomía, de la Universidad de *Canterbury*. Ambos cubren un rango de $\lambda \sim (4.500 - 7.080) \text{ \AA}$, con una dispersión lineal de 2 \AA/mm , fraccionado en 44 y 46 órdenes, respectivamente. Además, se utilizó una lámpara de comparación de Th-Ar, para la calibración de la longitud de onda.

Tabla 1. Velocidades radiales reportadas previamente para las estrellas supergigantes HD 159378 y HD 75276.

Estrella	($V_r \pm \sigma$) km/s	Referencia
HD 159378	$-15,8 \pm 1,3$	Balona (1982)
	$-14,7 \pm 1,7$	Kipper (2008)
	$-16,72 \pm 0,3$	Mermilliod et al. (2008)
	$-15,58 \pm 1,02$	Brown et al. (2021)
HD 75276	32	Wilson (1953) y Kharchenko et al. (2007)
	$21,99 \pm 0,38$	Usenko et al. (2011)

En las Figs. 1 y 2, se observan porciones de los espectros bajo estudio, de las estrellas supergigantes HD 159378 y HD 75276, respectivamente.

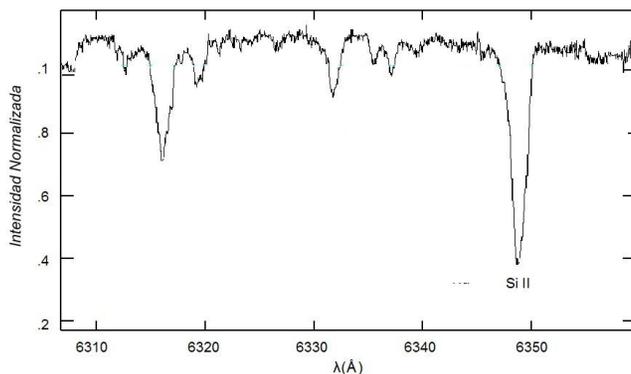


Fig. 1. Porción del espectro de la estrella HD 159378, donde se muestran las líneas identificadas y seleccionadas en este rango.

3 Metodología

Antes de iniciar el proceso de selección e identificación de las líneas fotosféricas de los espectros bajo estudio, se realizó el ajuste de una Gaussiana a cada una de las líneas de

ambos espectros, utilizando un conjunto de sub-rutinas del software de reducción IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*). Esto con el propósito de determinar el punto mínimo de las líneas de absorción, y así obtener el valor preciso de la longitud de onda asociada a cada línea de los espectros.

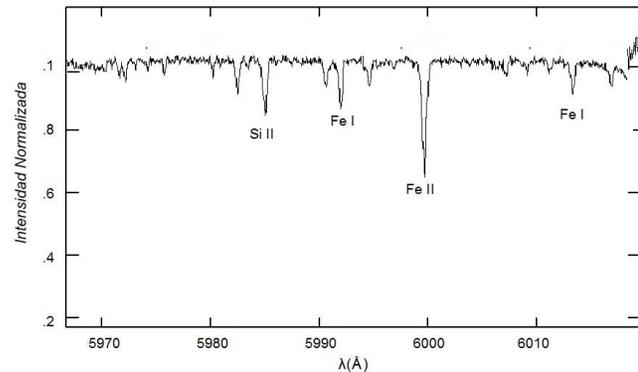


Fig. 2. Porción del espectro de la estrella HD 75276, donde se muestran las líneas identificadas y seleccionadas en este rango.

Luego, a través de un riguroso análisis espectroscópico y siguiendo criterios estándares de medida, identificación y selección de líneas fotosféricas que se describen a continuación, se procedió a la selección de las líneas espectrales. Estos criterios contemplan (a) el ancho de la línea debe ser similar al ancho que presentan la mayoría de las líneas del espectro; (b) así mismo, el perfil de la línea debe ser aproximadamente simétrico; (c) la profundidad del centro de la línea debe ser por lo menos 10% del continuo local, para no ser catalogada como ruido; (d) 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.

Posteriormente, ya seleccionadas las líneas espectrales, se realizó la identificación de las especies atómicas correspondientes a cada una de ellas, utilizando la Tabla de Multipletes de Moore (1972); que permite conocer la longitud de onda teórica o en reposo, el grado de ionización y el multiplete de cada línea. Para cada una de las líneas medidas, seleccionadas e identificadas en ambos espectros, se procedió a calcular la velocidad radial mediante la aplicación del Efecto Doppler. A estos valores calculados, se les sumó algebraicamente, y de manera individual, la corrección baricéntrica, para finalmente obtener el valor promedio de la velocidad radial de las líneas fotosféricas seleccionadas para cada estrella y su desviación estándar.

Ahora bien, es importante mencionar que, debido al comportamiento inestable de la atmósfera 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.

4 Análisis de los Resultados

4.1 Velocidad radial para las líneas fotosféricas de la estrella HD 159378

En el espectro de HD 159378 analizado, se identificó un total de 38 líneas fotosféricas, siguiendo minuciosamente la metodología descrita en la sección anterior. Todas las líneas identificadas, son líneas de absorción formadas en la fotosfera y no se encontraron líneas de emisión.

Ahora bien, a cada velocidad radial de las 38 líneas identificadas, se sumó algebraicamente una corrección baricétrica de $-23,02$ km/s. Así, se observó que los valores calculados de la velocidad radial de cada una de las 38 líneas seleccionadas, muestran una variación un poco errática; esto es, se obtienen valores que van desde $-7,30$ km/s, hasta $-21,99$ km/s. Sin embargo, estas diferencias en la velocidad radial también fueron reportadas por Balona (1982) y Kipper (2008).

A pesar de esto, se determinó el promedio de la velocidad radial de la estrella HD 159378, arrojando un valor de $(-14,6 \pm 0,6)$ km/s. Este resultado se aproxima, en gran medida, a los valores de las velocidades radiales reportadas previamente por Balona (1982), Kipper (2008) y Brown et al. (2021); pero, difiere $\sim 2,1$ km/s al valor reportado por Mermilliod y col. (2008), lo que puede indicar que la estrella presenta una variabilidad en su velocidad radial.

Para el cálculo de la velocidad radial promedio de las líneas fotosféricas dado anteriormente para HD 159378, no se tomó en cuenta la línea H α de la Serie de Balmer hallada en el espectro, que por ser una línea de resonancia fue tratada por separado. En la Fig. 3, se puede observar la Línea H α , que muestra un perfil en absorción muy marcado en su región central, bordeado por una emisión en azul, con características muy similares a las reportadas por Kipper (2008).

Para el caso de la línea H α , se obtuvo un valor de velocidad radial $-5,1$ km/s que, si se compara con el valor de la velocidad radial promedio obtenido para las líneas fotosféricas, se puede apreciar una diferencia importante. Ahora bien, se sabe que los movimientos que tienen lugar en las atmósferas estelares, pueden afectar la forma y la intensidad de las líneas espectrales. Este hecho, se puede apreciar con mayor facilidad en las líneas de la serie Balmer, porque al formarse en las capas más externas de la atmósfera, son más afectadas por la presencia de estos movimientos. En el caso de la estrella HD 159378, se hace evidente este comportamiento, al observar el perfil de la línea H α y la diferencia que existe entre el valor de su velocidad radial y la velocidad radial promedio de las líneas fotosféricas, lo que podría estar indicando que la atmósfera de la estrella está experimentando turbulencias o movimientos convectivos.

Por otro lado, en el espectro bajo estudio, se identificaron las siguientes especies atómicas: Fe I, Fe II, Ca I, Si II, S II, Sc II, Ti I, Ti II, y Cr II; siendo Fe I, el elemento químico más abundante de la atmósfera de la estrella con un

26%, seguido por Cr II con un 21%.

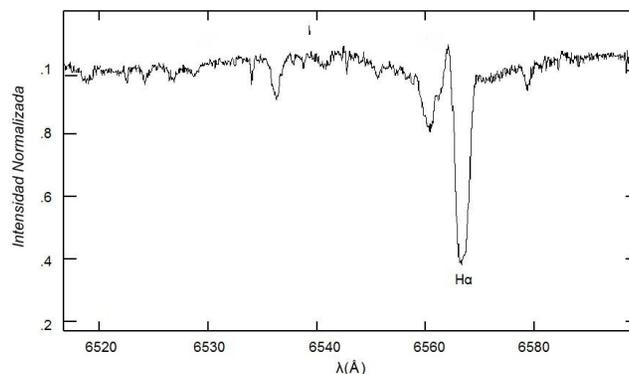


Fig. 3. Línea H α identificada en el espectro bajo estudio de la estrella HD 159378.

4.2 Velocidad radial para las líneas fotosféricas de la estrella HD 75276

Siguiendo el mismo procedimiento que se utilizó con el espectro de HD 159378, se realizó el estudio y análisis del espectro de HD 75276. Así, se logró identificar un total de 146 líneas fotosféricas, todas en absorción. Además, se pudo determinar que los elementos más abundantes presentes en la atmósfera de HD 75276 son: Fe I (40%), Fe II (25%), Cr II (9%) y Ti II (8%).

A las 146 líneas identificadas, se aplicó una corrección baricétrica de $+7,8$ km/s. Luego, se calculó la velocidad radial promedio del espectro; así como, su desviación estándar, obteniendo como resultado, $(24,0 \pm 0,4)$ km/s. Cabe destacar que, no se tomó en cuenta la velocidad radial de la línea H β ; ya que, por su naturaleza, fue tratada por separado.

En la Tabla 1, se puede notar que el valor obtenido para la velocidad radial de HD 75276, se encuentra entre los valores reportados anteriormente por Usenko y col. (2011), Wilson (1953) y Kharchenko et al. (2007). En este sentido, es importante destacar dos cosas; primero, que el valor de la velocidad radial promedio obtenido en el presente estudio, fue determinado a partir de 146 líneas fotosféricas, lo cual es un aporte importante, puesto que es la primera vez que se identifican tantas líneas para esta estrella. Segundo, que, aunque son valores cercanos entre sí, existen diferencias, lo que podría estar indicando la posibilidad de que la estrella tenga una velocidad radial variable. Esto sería posible comprobarlo posteriormente, a través del estudio de un mayor número de espectros de HD 75276, tomados de forma consecutiva durante un periodo de tiempo

prolongado, para poder comprobar la posible variabilidad.

En cuanto a las líneas de la Serie de Balmer, en el rango espectral estudiado solo se encontró una de ellas; específicamente, H β ; con una velocidad radial + 24,2 km/s. Además, como se puede observar en la Fig. 4, no muestra un perfil P-Cygni, se encuentra en completa absorción. Además, es importante destacar que, es la primera vez que se reporta la velocidad radial de una de las líneas de la Serie de Balmer para esta estrella y que se hace un análisis de la misma.

5 Conclusiones

A través de un riguroso análisis llevado a cabo en los espectros de las estrellas supergigantes HD 159378 y HD 75276, se pudo determinar la velocidad radial de cada una de ellas; siendo uno de los parámetros físicos más importantes que caracteriza a las estrellas.

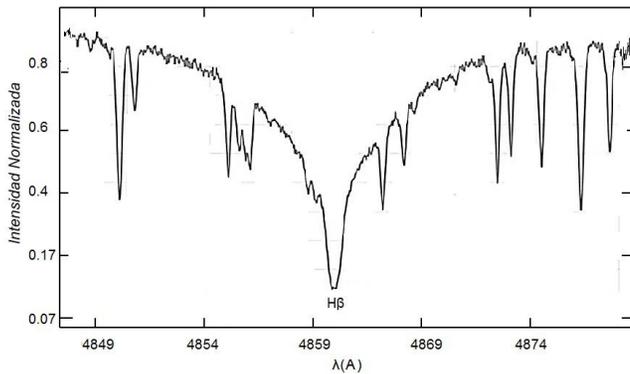


Fig. 4. Línea H β de la estrella HD 75276, presente en el espectro bajo estudio.

Así, en el espectro de HD 159378, se identificaron 38 líneas fotosféricas y se calculó la velocidad radial para cada una de ellas, con su respectiva corrección baricéntrica de - 23,02 km/s. Luego, se derivó la velocidad radial promedio, obteniendo un valor de (- 14,6 \pm 0,6) km/s. Dicho valor se encuentra en el rango de valores previamente reportados por otros autores.

Además, se identificó la línea H α de la Serie de Balmer, y se obtuvo un valor para su velocidad radial de - 5,1 km/s, que, si se compara con el valor obtenido de la velocidad radial promedio para las líneas fotosféricas de esta estrella, difiere en 9,5 km/s; lo que indica la presencia de movimientos turbulentos en la atmósfera de la estrella HD 159378.

Por otro lado, para la estrella HD 75276, se identificó un total de 146 líneas fotosféricas; siendo un aporte significativo; debido a que, hasta la fecha, no se había reportado esta cantidad de líneas fotosféricas. Para cada una de ellas, también se calculó la velocidad radial, aplicando una corrección baricéntrica de +7,8 km/s.

Asimismo, se determinó la velocidad radial promedio para estas líneas, siendo el resultado de (24,0 \pm 0,4) km/s. Este valor se encuentra entre los valores reportados por

Usenko y col. (2011), Wilson (1953) y Kharchenko et al. (2007). Pero es importante mencionar, que la diferencia entre estos valores podría indicar que la estrella tiene una variabilidad en su velocidad radial.

En cuanto a las líneas de la Serie de Balmer de HD 75276, solo se encontró la línea H β , obteniendo una velocidad radial de + 24,2 km/s. La forma de esta línea presenta un perfil Lorentziano, en completa absorción y con las alas anchas, debido al ensanchamiento por presión ocasionado por las colisiones de los átomos e iones en su atmósfera.

Finalmente, es importante destacar, que es la primera vez que se hace un análisis de alguna de las líneas de la Serie de Balmer para la estrella HD 75276; y, por ende, es la primera vez que se calcula el valor de su velocidad radical.

Agradecimientos

Agradecemos al CDCHTA-ULA, por su valiosa colaboración en la investigación, proyecto C-2009-24-05-A.

Referencias

- Balona, L. A. (1982). Radial velocity observations of yellow supergiants. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 201(1), pp. 105–110.
- Barbuy, B., De Medeiros, J. R., y Maeder A. (1996). Carbon, nitrogen and oxygen abundances in yellow supergiants. *Astronomy and Astrophysics*, 305, pp. 911-919.
- Brown, A. G. A.; Vallenari, A.; Prusti, T.; de Bruijne, J. H. J.; Babusiaux, C.; Biermann, M.; Creevey, O. L.; Evans, D. W.; Eyer, L.; Hutton, A.; Jansen, F.; Jordi, C.; Klioner, S. A.; Lammers, U.; Lindegren, L.; Luri, X.; Mignard, F.; Panem, C.; Pourbaix, D.;... y otros, en Gaia Collaboration; (2021). Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties. *Astronomy & Astrophysics*, 649, id.A1, 20 pp.
- Garzón, J., Enríquez, D. y Duran, C. (2009). *100 Conceptos básicos de Astronomía*. Madrid, España: S.L. Sociedad Española de Astronomía.
- Gray, R. O., Graham, P. W., & Hoyt, S. R. (2001). The physical basis of luminosity classification in the late A, F, and Early G-Type stars. II. Basic parameters of program stars and the role of microturbulence. *The Astronomical Journal*, 121(4), pp. 2159-2172.
- Humphreys, R. M. (1970). The Space Distribution and Kinematics of Supergiants. *The Astronomical Journal*, 75, pp. 602-623.
- Kharchenko, N. V., Scholz, R. D., Piskunov, A. E., Röser, S., & Schilbach, E. (2007). Astrophysical supplements to the ASCC-2.5: Ia. Radial velocities of ~55000 stars

and mean radial velocities of 516 Galactic open clusters and associations. *Astron. Nachr.*, 328, pp. 889-896.

Kipper, T. (2008). Optical Spectrum of the Yellow Supergiant HD 159378. *Baltic Astronomy*, 17, pp. 311-319.

Massey, P., DeGioia-Eastwood, K., & Waterhouse, E. (2001). The progenitor masses of Wolf-Rayet stars and luminous blue variables determined from cluster turnoffs. II. Results from 12 galactic clusters and OB Associations. *The Astronomical Journal*, 121(2), pp. 1050-1070.

Mermilliod, J.C., Mayor, M. and Udry, S. (2008). Red Giants in open clusters. Mean radial velocities for 1309 stars and 166 open clusters. *Astronomy and Astrophysics* 485(1), pp. 303-314.

Moffat, A. F. J., Fitzgerald, M., & Jackson, P. D. (1977). Trumpler 27 - a heavily reddened young open cluster with blue and red supergiants. *The Astrophysical Journal*, 215, pp. 106.

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

Rosenzweig, P., García Lugo, G., Peña, L., Burgos, J., y Hearnshaw, J. (2012). Análisis de observaciones espectroscópicas de dos estrellas supergigantes (HD 161471 y HD 54605): determinación de la velocidad radial. *Scientific Journal from the Experimental Faculty of Sciences*, 20 (4), pp. 237 - 243.

Rosenzweig Levy, P., García Lugo, G., Perez, C. y Pooley, D. (2017). Análisis espectral de la estrella Post-AGB HD 172481. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 38 (3), pp. 239 - 248.

Russell, S. C. & Bessell, M. S. (1989). Abundances of the heavy elements in the Magellanic Clouds. I. metal abundances of f-type supergiants. *The Astrophysical journal supplement series*, 70, pp. 865-898.

Usenko, I. A., Kniazev, A. Y., & Berdnikov, L. N. (2011). Spectroscopic studies of Cepheids (S Cru, AP Pup, AX Cir, S TrA, T Cru, R Mus, S Mus, U Car) and semiregular bright supergiants (V382 Car, HD 75276, R Pup) in the southern hemisphere". *Astronomy Letters*, 37, pp. 499-507.

Wilson, R. E. (1953). *General Catalogue of Stellar Radial Velocities (GCRV)*. Carnegie Institute Washington D.C. Publication. VizieR On-line Data Catalog, III/21/gcrv.

Recibido: 02 de febrero de 2024

Aceptado: 02 de junio de 2024

García Lugo, Gabriela: Magister Scientiae en Física Fundamental. Profesora Agregada e Investigadora del Grupo de Astrofísica Teórica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Correo electrónico: prof.gabriela.garcia.lugo@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-5848-7192>

Rosenzweig, Patricia: Vicerrectora Académica, Universidad de Los Andes. Ph.D. y Licenciada en Física. Profesora Titular de la Facultad de Ciencias de la ULA, Mérida, Venezuela. Investigadora y experta en el área de espectroscopia.

<https://orcid.org/0000-0003-1991-0349>

Paredes, Ender: Licenciado en Física, 2024, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Correo electrónico: enderapophis@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-9221-0681>

Pérez, Carlos: Licenciado en Física, Profesor e Investigadora de la Facultad de Ciencias de la ULA, Grupo de Astrofísica Teórica, Mérida, Venezuela.

Correo electrónico: enriquepara8@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-6956-7867>

Céspedes, María: Licenciada en Física, 2022, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Correo electrónico: mcespedeschacon@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-4067-0750>

Rodríguez, Armando: Magister Scientiae en Matemáticas (2013), Universidad de Los Andes. Profesor agregado del Departamento de Cálculo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Correo electrónico: rangosecuencial@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-1544-9288>

Celis, Maria Teresa: Ingeniero Químico Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, Venezuela-1981; Master en Ingeniería Química, 1997, University of South Florida (USF), USA; Ph.D. en Ingeniería Química 2000, USF, USA; Post. Doc. (Water-based, Natural Polymer Surfactants: Implications for Deepwater Horizon Oil Spill Dispersions and Cleanup Operations), 2012, USF, USA; Directora Laboratorio de Polímeros y Coloides, Facultad de Ingeniería (ULA), Coordinadora técnica Laboratorio FIRP, Facultad de Ingeniería (ULA), Profesora Titular, Facultad de Ingeniería ULA. Investigadora y experta en el área de polímeros, emulsiones y caracterización de sistemas dispersos usando espectroscopia, Miembro correspondiente estatal de la Academia de Mérida. Coordinadora del Vicerrectorado Académico ULA. Editor en Jefe, Revista Ciencia e Ingeniería ULA. Correo electrónico: celismt@ula.ve.

<https://orcid.org/0000-0003-3618-3569>

