



Estimación de la velocidad de expansión de los vientos estelares de la estrella EZ CMa

Por: Moisés Montero Reyes Ortíz

Introducción

En este artículo, se muestra un sencillo método para estimar de manera aproximada la velocidad terminal de expansión de los vientos estelares de la estrella EZ CMa (HD 50896), a partir del análisis de las líneas de emisión de Helio de su espectro, obtenido con equipamiento de aficionado.

El espectro en cuestión fue capturado con un espectroscopio de baja resolución modelo SA-100 Star Analyzer, una cámara Canon EOS M50 y un telescopio SCT de 8" desde la ciudad de Cochabamba - Bolivia, el 14 de abril de 2025.

La estrella EZ CMa, de tipo espectral WN4b, es una estrella tipo Wolf Rayet (WR) con una magnitud que oscila alrededor de 6.9 (V). Las estrellas WR son estrellas muy calientes y masivas - con masas superiores a 20 veces la del Sol - y se caracterizan por su elevada luminosidad y grandes pérdidas de masa debido a fuertes vientos estelares.

A partir del análisis de las líneas de emisión de Helio, fue posible realizar una aproximación de la velocidad de expansión de los vientos estelares de esta estrella.

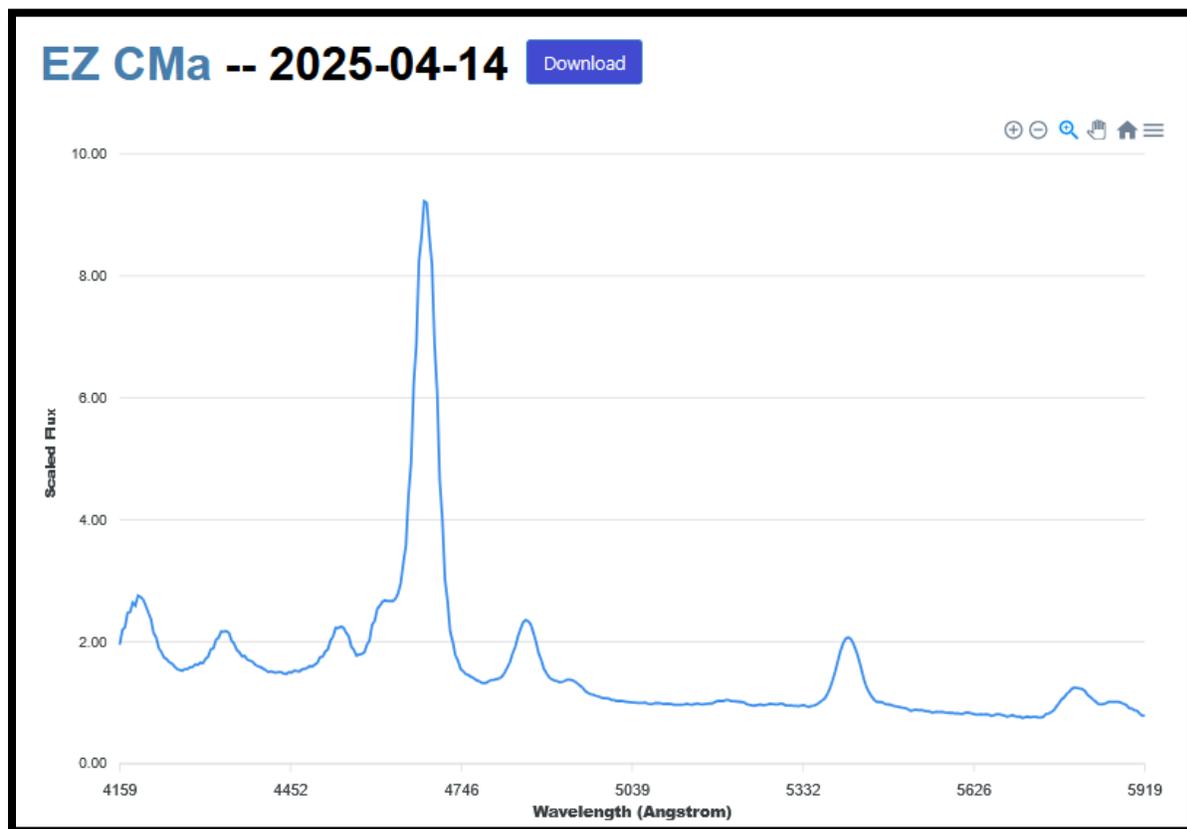
Discusión

El espectro de la estrella EZ CMa fue calibrado en longitud de onda y respuesta instrumental utilizando como patrón la estrella HD 50711 de tipo espectral A1/2V. La estrella de referencia o estrella patrón, no es más que una estrella de tipo espectral conocido, que permite obtener la dispersión en angstrom por pixel, la cual depende de las características del equipo: espectroscopio - cámara - telescopio. Una vez obtenido el valor de la dispersión espectral de la estrella de referencia, fue posible calibrar el espectro de EZ CMa por longitud de onda.

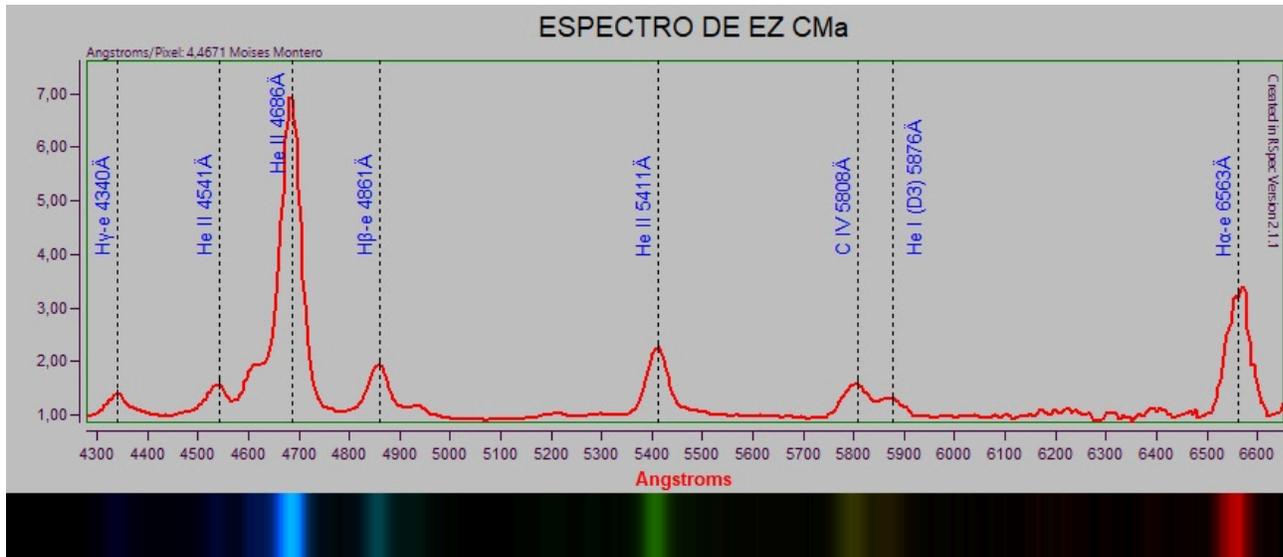
También se realizó la calibración por respuesta instrumental utilizando la misma estrella de referencia, y cuyo espectro fue capturado bajo condiciones similares a las del

espectro de EZ CMa. El objetivo principal de la calibración por respuesta de instrumento, es corregir las distorsiones introducidas por el telescopio, el espectrógrafo y la cámara al medir la luz de la estrella. En esencia, se busca obtener el espectro "verdadero" de la estrella, libre de las "huellas" del instrumento utilizado para observarla, así como de los efectos de la atmósfera.

El software utilizado para la calibración fue RSpec V.2.1.1. Una vez calibrado por dispersión y respuesta de instrumento, el espectro fue sometido a revisión por parte de un experto, luego de lo cual fue aceptado para su inclusión en la base de datos de espectros de la AAVSO: <https://apps.aavso.org/avspec/obs/18533>



Solo para fines de una mejor visualización, el espectro fue rectificado y se identificaron las líneas de emisión utilizando el software RSpec V2.1.1:



Espectro rectificado de EZ CMa. Algunas líneas de He II son muy fáciles de confundir con las líneas de hidrógeno de la serie Balmer, puesto que están muy cercanas las unas a las otras y son difíciles de separar en baja resolución.

Ahora, ya contando con el espectro calibrado, procedemos a discutir la manera de calcular la velocidad de los vientos estelares de EZ CMa:

La expansión de la materia en el exterior de las estrellas WR son eventos muy violentos que se pueden estudiar a partir del ensanchamiento de las líneas de emisión de Helio. Estas líneas aparecen debido a que el hidrógeno es expulsado desde la superficie dejando al descubierto el Helio del interior de la estrella.

Las estrellas Wolf-Rayet (WR) son conocidas por sus espectros inusuales, dominados por líneas de emisión anchas y potentes de helio ionizado y otros elementos. El ensanchamiento de estas líneas espectrales, se atribuye principalmente al ensanchamiento Doppler debido a potentes vientos estelares.

Estos vientos extremadamente fuertes y rápidos, expulsan material a velocidades que oscilan entre cientos y miles de kilómetros por segundo. Este material, que fluye rápidamente, emite luz, incluyendo las características líneas de emisión de helio. Debido al efecto Doppler, la luz emitida por el gas que se acerca a nosotros presenta un desplazamiento al azul (longitudes de onda más cortas), mientras que la luz del gas que se aleja presenta un desplazamiento al rojo (longitudes



de onda más largas). Dado que el viento estelar abarca un amplio rango de velocidades en diferentes direcciones, las líneas de helio emitidas se observan como una combinación de estas longitudes de onda desplazadas por el efecto Doppler, **lo que resulta en un perfil de línea significativamente ensanchado.**

Cuanto mayor sea la velocidad del viento, más anchas serán las líneas de emisión. Si bien existen otros mecanismos de ensanchamiento de líneas, como el ensanchamiento por presión y el ensanchamiento Stark, las condiciones extremas en las atmósferas extendidas y los potentes vientos de las estrellas Wolf-Rayet, hacen que el ensanchamiento Doppler sea el factor dominante responsable de las características líneas de emisión ensanchadas.

Es decir, las anchas líneas de helio observadas en los espectros de las estrellas Wolf-Rayet, son una consecuencia directa del efecto Doppler causado por los vientos estelares en expansión a muy alta velocidad.

De acuerdo a los modelos físicos, es posible aproximar la velocidad de expansión de los vientos a través de la siguiente fórmula, que deriva de la ecuación Doppler convencional:

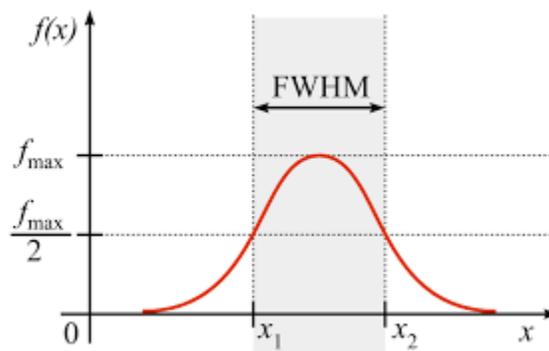
$$v_{\infty} \approx \frac{\text{FWHM}_{\text{Emission}}}{\lambda_0} c \quad \{1\}$$

Donde:

- v_{∞} = Velocidad terminal de expansión: Máxima velocidad que puede alcanzar el viento estelar.
- FWHM = Full Width at Half Maximum (Ancho total a la mitad del máximo).
- λ_0 = Longitud de onda del pico de la línea de emisión.
- c = Velocidad de la Luz.

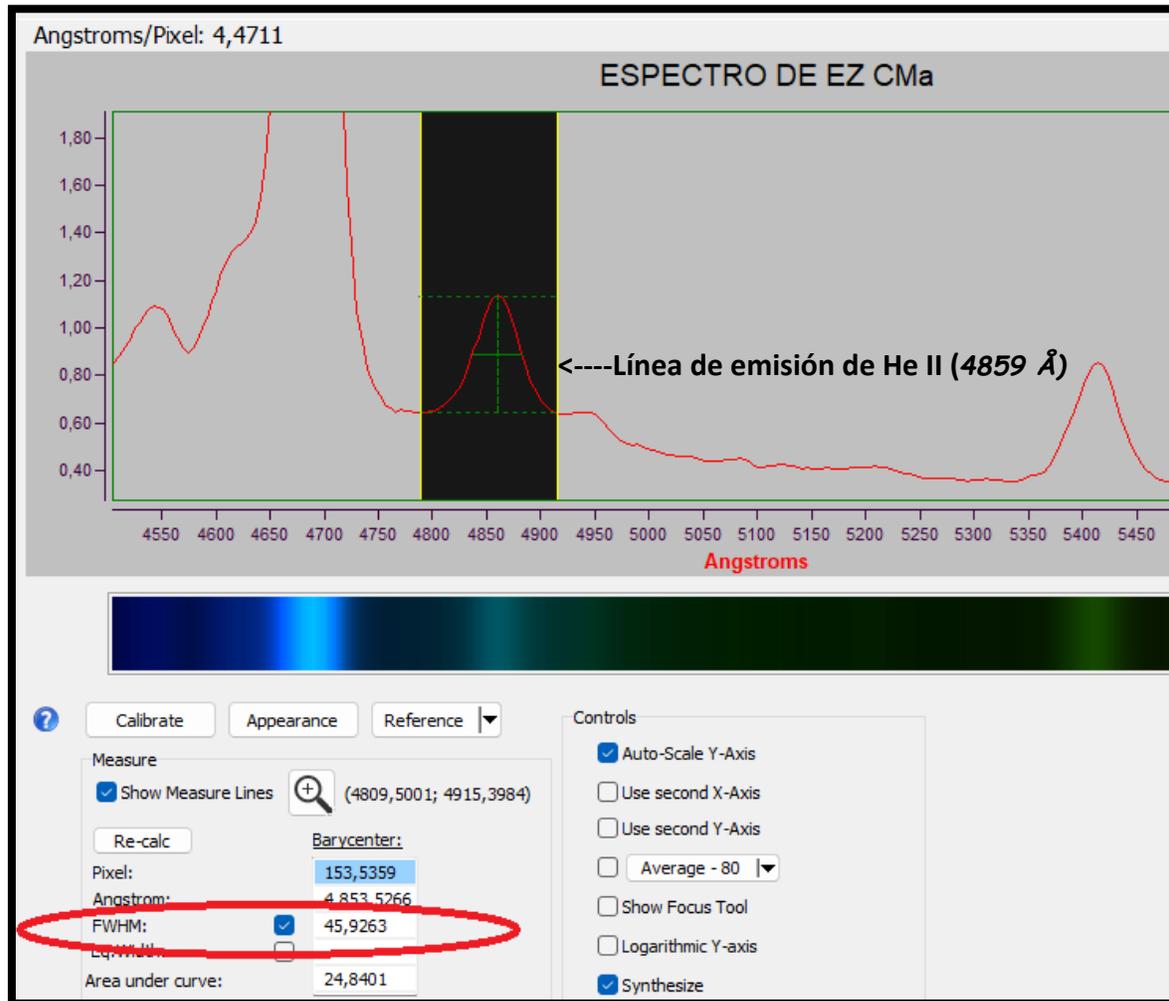
Para poder utilizar la fórmula, necesitamos en primera instancia medir el valor FWHM.

El valor FWHM se mide identificando el valor máximo de una línea de emisión, luego determinando los dos puntos en la línea donde la altura es la mitad de ese valor máximo. La diferencia entre esos dos puntos es el valor FWHM.

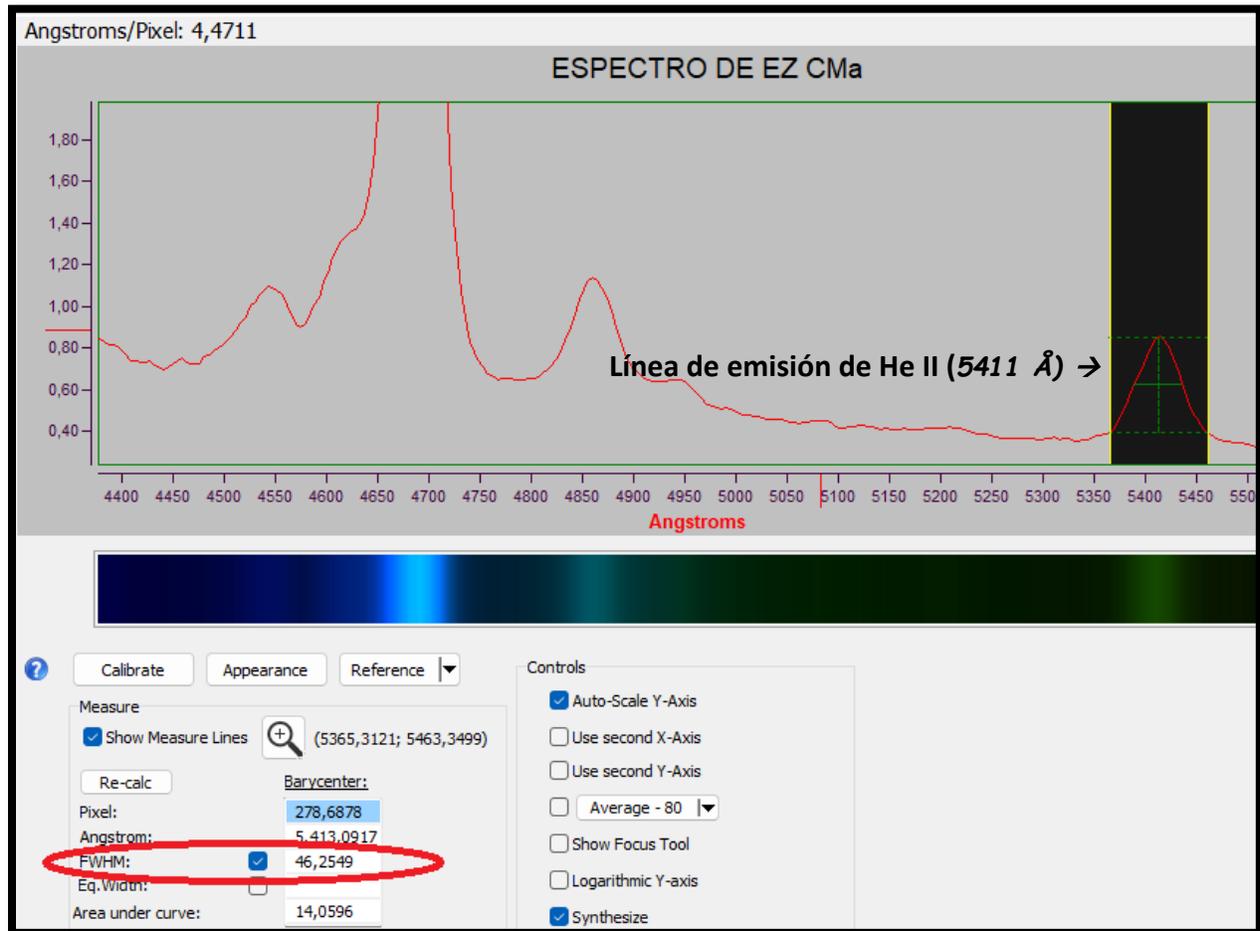


Lo más recomendable es hacer la medición del FWHM sobre líneas que tengan una forma aproximadamente gaussiana. Para el caso del espectro de EZ CMA se escogieron las líneas de Helio a 4859 Å y 5411 Å.

El software RSpec tiene la capacidad de medir el valor FWHM. Para ello, el usuario debe escoger manualmente los extremos de una línea de emisión y el software hace el resto. A continuación, se muestra el valor del FWHM obtenido a partir de las líneas de Helio ensanchadas del espectro:



Obtención del valor FWHM para la línea de emisión He II a 4859 Å. Resulta FWHM= 45.93 Å



Obtención del valor FWHM para la línea de emisión He II a 5411 Å. Resulta FWHM= 46.26 Å

Entonces, los valores FWHM medidos son: 45.93 Å para la línea a 4859 Å y 46.26 Å para la línea a 5411 Å.

Ahora bien, antes de introducir los valores FWHM en la formula {1}, es necesario realizar una corrección por ensanchamiento instrumental.



El ensanchamiento instrumental se refiere al aumento en el ancho observado de una línea espectral debido a las limitaciones del instrumento utilizado para medir el espectro.

La corrección por ensanchamiento instrumental se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$FWHM_{\text{corr}} = \sqrt{FWHM_{\text{measured}}^2 - FWHM_{\text{instrument}}^2} \quad \{2\}$$

Donde:

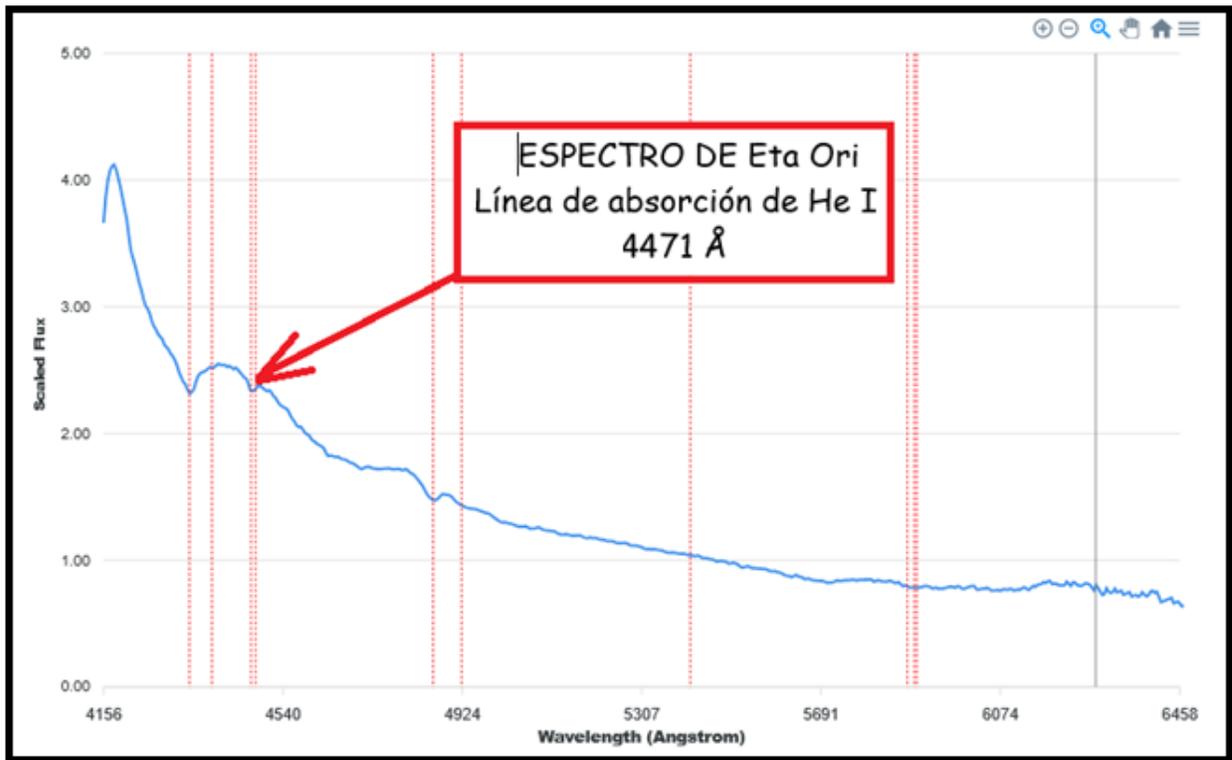
$$FWHM_{\text{Instrument}} = \frac{\lambda}{R} \quad \{3\}$$

λ = longitud de onda;
R = Resolución.

La resolución "R" del espectroscopio, en términos sencillos, se refiere a su capacidad para distinguir detalles finos en un espectro, como líneas espectrales muy estrechas, y se puede calcular dividiendo la longitud de onda media de una línea de absorción entre la diferencia de longitudes de onda en los extremos de dicha línea, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$R = \lambda / \Delta \lambda \quad \{4\}$$

Para el caso del equipo utilizado, se midió la resolución a partir de la línea de absorción más estrecha observada en el espectro de la estrella Eta Ori, tomado el 14 de enero de 2024 desde Cochabamba-Bolivia, con el mismo equipo anteriormente mencionado:



Con ayuda del software RSpec, se midieron las longitudes de onda en los extremos de la línea de absorción de He I (4471 Å). A continuación, se muestra la línea ampliada para una mejor visualización y se resaltan los valores en angstroms de los extremos de la línea:



Se observan los extremos de la línea de absorción que va de los 4467 Å a los 4489 Å. Entonces, reemplazando valores en la fórmula {4}:

$$R \approx 4471 \text{ \AA} / (4489 \text{ \AA} - 4467 \text{ \AA}) ; \text{ resulta:}$$

$$\text{Resolución} \approx 203$$

Reemplazamos el valor de la resolución obtenida, en la fórmula {3} para las líneas de Helio escogidas:

a) Para la línea a 4859 Å:

$$FWHM_{instr} = \lambda/R = 4859/203 = 23.9$$



b) Para la línea a 5411 Å:

$$FWHM_{instr} = \lambda / R = 5411/203 = 26.7$$

Ahora reemplazamos los valores de $FWHM_{instrument}$ en la fórmula {2} para obtener el FWHM corregido por ensanchamiento instrumental:

a) Para la línea a 4859 Å:

$$FWHM_{corr} = \sqrt{FWHM_{measured}^2 - FWHM_{instrument}^2}$$

$$FWHM_{corr} = \sqrt{45.9^2 - 23.9^2}$$

$$FWHM_{corr} = 39.2$$

b) Para la línea a 5411 Å:

$$FWHM_{corr} = \sqrt{46.3^2 - 26.7^2}$$

$$FWHM_{corr} = 37.8$$

Ahora procedemos a realizar el cálculo de la velocidad reemplazando los valores FWHM corregidos en la fórmula {1}:

a) Para la línea a 4859 Å:

$$V_{\infty} \approx (39.2 \text{ Å} / 4859 \text{ Å}) * 299,792 \text{ km/s}$$

$$V_{\infty} \approx 2419 \text{ km/s}$$

b) Para la línea a 5411 Å:

$$V_{\infty} \approx (37.8 \text{ Å} / 5411 \text{ Å}) * 299,792 \text{ km/s}$$

$$V_{\infty} \approx 2094 \text{ km/s}$$

Ahora bien, sacamos un promedio de ambos valores para tener una idea más global de la velocidad de expansión de la materia expulsada por la estrella:

$$V_{\infty} \approx (2419 + 2094)/2 \rightarrow V_{\infty} \approx 2250 \text{ km/s}$$

Es importante aclarar que el cálculo arroja un resultado puramente aproximado, puesto que no se han considerado otras correcciones rigurosas que afectan el resultado final. Sin embargo, aunque burda, la aproximación nos da una clara idea del orden de magnitud de la velocidad de los vientos estelares de EZ CMA y de lo violento de este tipo de fenómenos. Asimismo, es necesario considerar que el resultado corresponde a la componente del vector velocidad que se halla en la línea de visión Tierra-Estrella.¹

Finalmente, resultó muy alentador comparar el valor obtenido con publicaciones especializadas sobre la estrella EZ CMA. El resultado es bastante consistente con los publicados en artículos profesionales (papers) como los que se referencian a continuación:

- AN EMPIRICAL MODEL FOR THE WOLF-RAYET STAR HD 50896 (The Astrophysical Journal Supplement Series, 63:965-981, 1987 April)
https://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-article_query?1987ApJS...63..965H&defaultprint=YES&page_ind=0&filetype=.pdf
(donde: $1700 \text{ km/s} \lesssim V_{\infty} \lesssim 2600 \text{ km/s}$)
- SPECTRAL ANALYSIS OF THE WOLF-RAYET STAR HD 50896
Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361), vol. 194, no. 1-2, April 1988, p. 190-196.
<https://articles.adsabs.harvard.edu/full/1988A%26A...194..190H/0000195.000.html>
(donde: $1700 \text{ km/s} \lesssim V_{\infty} \lesssim 2500 \text{ km/s}$)

¹ Otro factor que puede afectar el resultado en cierta medida, es el grado de incertidumbre en el valor medido de la resolución. La resolución depende mucho del tamaño de la imagen de la estrella ("seeing" y foco del equipo) y pudo haber cambiado entre las fechas de observación de ETA Ori y EZ CMA. Lo ideal hubiera sido tomar ambos espectros bajo las mismas condiciones. Por otra parte, es probable que la línea de absorción escogida no sea la más idónea para medir la resolución, pero era la que se tenía disponible para el efecto.



Conclusiones

Haciendo uso de un espectroscopio de baja resolución modelo SA-100 Star Analyzer, una cámara no específicamente diseñada para astronomía y un telescopio de aficionado, fue posible estimar de manera aproximada la velocidad de expansión del viento estelar de la estrella Wolf -Rayet "EZ CMa", utilizando un modelo físico que se deriva de la ecuación Doppler convencional.

El Software RSpec para espectroscopía, resultó apropiado y amigable para medir el valor FWHM de las líneas de emisión de Helio de la estrella EZ CMa, lo que permitió realizar el cálculo de velocidades.

Se estimó la velocidad de los vientos estelares de EZ CMa en ~ 2200 km/s. El resultado, aunque es solo aproximado por carecer de correcciones más rigurosas, es consistente con las estimaciones publicadas en "papers" profesionales.

Bibliografía

Spectroscopy for Amateur Astronomers. Recording, Processing, Analysis and Interpretation
Marc F.M. Trypsteen/ Richard Walker; Edición 2017

Spectral Atlas for Amateur Astronomers. A Guide to the Spectra of Astronomical Objects and Terrestrial Light Sources
Richard Walker; Edición 2017

Agradecimientos

El primer borrador de este artículo fue enviado a los siguientes expertos, quienes emitieron comentarios muy útiles, y, sobre todo, alentadores, que ayudaron a dar forma final al documento:

John E. Beckman (PhD.); Instituto de Astrofísica de Canarias.

Robin Leadbeater; diseñador del espectroscopio Star Analyzer y espectroscopista experto.

Tom Field; desarrollador del software RSpec, espectroscopista, y ex editor colaborador de la revista Sky & Telescope.

Artículo publicado el 25 de mayo, otoño de 2025
Cochabamba-Bolivia