



Emisión molecular de ^{12}CO en una estrella Be clásica

Y.R. Cochetti^{1,2}, M.L. Arias^{1,2}, M. Kraus³, L.S. Cidale^{1,2}, A.F. Torres^{1,2} & A. Granada⁴

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

² *Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina*

³ *Astronomický ústav, Akademie věd České republiky, Republika Čechy*

⁴ *Laboratorio de Procesamiento de Señales Aplicadas y Computación de Alto Rendimiento, Sede Andina, UNRN, Argentina*

Contacto / cochetti@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / Las estrellas Be se caracterizan por presentar líneas en emisión de hidrógeno y de metales una vez ionizados, de manera transitoria o permanente. La formación de estas líneas es atribuida a la presencia de una envoltura gaseosa en forma de disco rodeando a la estrella central. A lo largo de la última década, hemos realizado un seguimiento de una muestra de estrellas Be, con el objetivo de estudiar la evolución de sus envolturas a través de la variabilidad de sus propiedades físicas y cinemáticas. Una de las regiones espectrales que más estudiamos fue la del infrarrojo cercano, que presenta numerosas líneas en emisión de hidrógeno, helio y de algunos metales neutros o una vez ionizados. Sorpresivamente, en una de las observaciones realizadas, la estrella Be 12 Vul presentó emisión de ^{12}CO . La presencia de emisión molecular en las envolturas de las estrellas Be no había sido observada hasta el momento. Presentaremos aquí los espectros obtenidos en la banda espectral K y los parámetros determinados para la región emisora de ^{12}CO . Discutimos, además, las implicancias de esta detección en el estudio de las estrellas Be y otros grupos de objetos con características similares.

Abstract / Be stars present as their principal characteristic emission lines of hydrogen and singly ionized metals, which can be temporary or permanent. The origin of these lines is attributed to the presence of a gaseous disk-like envelope surrounding the star. Throughout the last decade, we have carried out temporal monitoring of a sample of Be stars to study the evolution of the disk through the variability of their physical properties and dynamical structure. We focused our studies on the near-infrared spectral range, which presents plenty of emission lines of hydrogen, helium and neutral or singly ionized metals. Surprisingly, in one of our observations, the Be star 12 Vul presented emission of ^{12}CO . The presence of ^{12}CO molecular band emission in Be stars had not been previously reported. We present here the near-infrared spectra in the K-band and the results on the modeling of the ^{12}CO molecular emission. We discuss the implications of this detection in the study of Be stars and other groups of objects with similar characteristics.

Keywords / techniques: spectroscopy — circumstellar matter — stars: emission-line, Be

1. Introducción

Las estrellas de tipo espectral B forman un grupo diverso, que incluye no solo estrellas B normales, sino también distintos subgrupos con peculiaridades espectroscópicas. Uno de ellos es el grupo de las estrellas Be, que se caracterizan por presentar (o haber presentado) líneas en emisión de hidrógeno y de metales una vez ionizados. Sumado a las líneas en emisión, estas estrellas presentan un moderado exceso infrarrojo (IR) debido a emisión libre-libre y libre-ligado en el disco. Las características observadas son atribuidas a la presencia de una envoltura circumestelar en forma de disco que rodea a la estrella central. El modelo más aceptado en la actualidad para describir la estructura de la envoltura es un disco viscoso en rotación Kepleriana (Rivinius et al., 2013).

Las estrellas Be presentan variabilidad espectroscópica y fotométrica en distintas escalas de tiempo. Se han observado cambios en los perfiles de las líneas, que pasan de tener un espectro B normal (perfil de absorción fotosférico, sin emisión), a tener un espectro Be (con uno o dos picos en emisión y una absorción central que no sobrepasa el nivel del continuo), a espectros

tipo Be-shell (donde la absorción central sobrepasa el nivel del continuo, o incluso puede observarse una leve emisión deformando el perfil de absorción fotosférico). Esta variabilidad es atribuida a procesos de formación y disipación de la envoltura, y a efectos de precesión de las mismas (Zorec et al., 2000; Rivinius et al., 2013). Debido a sobredensidades en el disco, por ejemplo por la presencia de un brazo espiral (Okazaki, 1991), se han observado variaciones en el cociente V/R, donde V y R son las intensidades de los picos azul y rojo del perfil en emisión, respectivamente. Han sido reportadas también variaciones fotométricas de corto período atribuidas a pulsaciones de la estrella central (Baade, 1982; Rivinius et al., 2003; Smith, 2001), o aumentos de brillo (*outburst*) debido a variaciones en la profundidad óptica de la envoltura o a eyecciones de masa (Hubert et al., 2000; Zorec et al., 2000).

2. Observaciones

En la región del cercano IR, estas estrellas presentan numerosas líneas en emisión de distintas series del

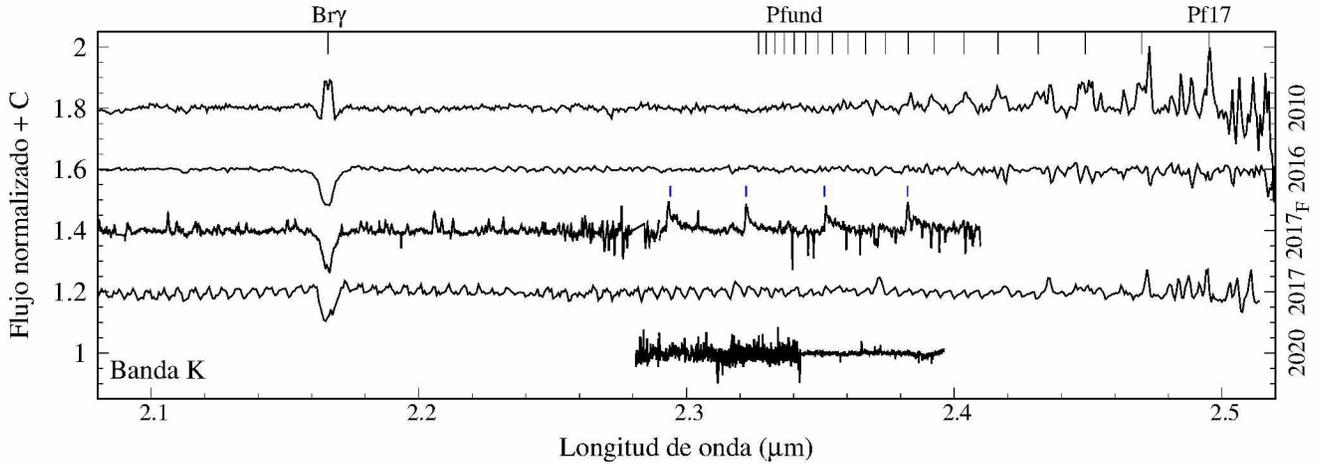


Figura 1: Espectros de 12 Vul en la Banda K del cercano IR. Los espectros fueron obtenidos con GNIRS, excepto el indicado como 2017_F, que fue obtenido con FIRE. Los espectros están normalizados y desplazados verticalmente para una mejor visualización. En el borde superior se indican las posiciones de las líneas de hidrógeno. Las cabezas de banda de ^{12}CO están señaladas en azul.

Tabla 1: Observaciones en el cercano IR de 12 Vul. Los espectros de GNIRS corresponden a los programas GN-2010B-Q-02, GN-2016A-Q-96, GN-2017A-Q-84 y GN-2020B-Q-212.

Fecha	Observatorio	Espectrógrafo	Resolución
2010-09-15	Gemini Norte	GNIRS-LS	1800
2016-06-25	Gemini Norte	GNIRS-XD	1800
2017-06-04	Las Campanas	FIRE	6000
2017-07-08	Gemini Norte	GNIRS-XD	1800
2020-09-06	Gemini Norte	GNIRS-LS	18000

hidrógeno. Estas líneas se forman en una región de la envoltura cercana a la estrella central, y presentan una baja contribución fotosférica, por lo que constituyen una valiosa herramienta para estudiar las propiedades físicas y dinámicas de las envolturas (Cidale et al., 2000; Mennickent et al., 2009; Granada et al., 2010; Cochetti, 2019). Con el objetivo de estudiar la variabilidad de las propiedades de la envoltura a lo largo del tiempo, hemos obtenido espectros en el cercano IR de la estrella Be 12 Vul en 5 oportunidades. La Tabla 1 muestra las fechas de observación, dónde y con qué instrumento se obtuvieron los datos y la resolución espectral alcanzada.

3. 12 Vul

12 Vul (HD 187811) es una estrella Be de tipo espectral B2.5 V, miembro de la Asociación Local (Local Association or Pleiades moving group, Eggen, 1975; Hoffleit & Jaschek, 1991). Ha sido catalogada como una binaria espectroscópica de dos espectros por Chini et al. (2012), con un período de 3.7 días reportado por Eggen (1975). Sin embargo, otros autores no han encontrado evidencia de la presencia de una compañera (Wang et al., 2018; Horch et al., 2020). Presenta variabilidad fotosférica (Lefèvre et al., 2009), y se han reportado *outbursts* de 100-200 días de duración (Hubert et al., 2000).

Tanto el perfil de línea de $\text{H}\alpha$ como las líneas del hidrógeno observadas en el cercano IR, presentan va-

riabilidad a lo largo de los años. Esta variabilidad fue asociada con procesos de formación y disipación de la envoltura (Sabogal et al., 2017), y cambios en la profundidad óptica de la misma (Mennickent et al., 2009; Lenorzer et al., 2002).

4. Resultados

En la Fig. 1 se muestran los espectros obtenidos en la Banda K en las distintas observaciones, donde puede verse la variabilidad de los perfiles de las líneas de hidrógeno. Lo más destacable es, sin embargo, la clara emisión de ^{12}CO presente en el primer espectro del 2017 (señalado como 2017_F). Las cabezas de banda de ^{12}CO están señaladas en azul en la Fig. 1.

Existen diferentes clases de estrellas masivas (YSOs, Herbig Ae/Be, B[e], YHG, entre otras) para las cuales se ha reportado la presencia de emisión molecular de CO en sus espectros infrarrojos (Scoville et al., 1979; Blum et al., 2004; Bik et al., 2006; Gledhill et al., 2011; Kraus, 2009). Sin embargo, la misma no había sido reportada previamente en las estrellas Be clásicas.

Utilizando el modelo propuesto por Kraus et al. (2000), realizamos un ajuste de la emisión observada. Este modelo considera la emisión proveniente de un disco o anillo en rotación donde el CO se encuentra en equilibrio termodinámico local, y la forma de los perfiles está dada por la superposición de transiciones roto-vibracionales. Obtuvimos los siguientes parámetros: V_{rot} (proyectada en la línea de la visual) = $42.5 \pm 2.5 \text{ km s}^{-1}$, $T_{\text{CO}} = 3250 \pm 250 \text{ K}$, $N_{\text{CO}} = (7.5 \pm 2.5) \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ (densidad columnar), $V_{\text{turb}} = 1.5 \text{ km s}^{-1}$ (velocidad de turbulencia). El espectro sintético obtenido fue también convolucionado con la resolución espectral. La comparación entre el espectro observado y el obtenido a partir del modelo para las dos primeras cabezas de banda de ^{12}CO se muestra en la Fig. 2. Un análisis más detallado sobre este interesante hallazgo se encuentra en Cochetti et al. (2021).

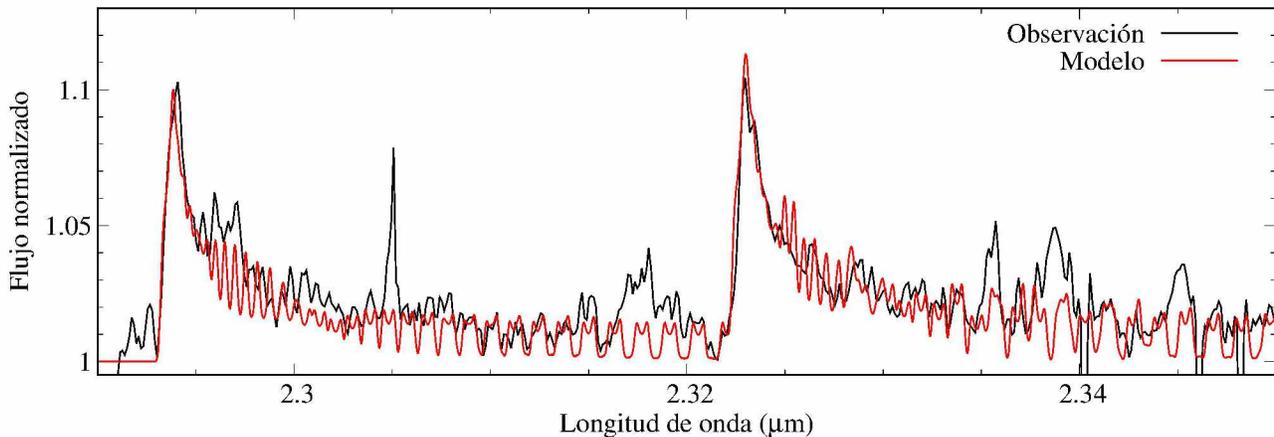


Figura 2: Porción del espectro de 12 Vul con las dos primeras cabezas de banda de ^{12}CO en emisión. El espectro sintético está graficado en rojo.

5. Discusión y trabajo a futuro

Proponemos distintos escenarios para explicar la emisión de ^{12}CO observada en esta estrella Be. Una posibilidad es que el disco en disipación haya alcanzado material previamente eyectado por la estrella en un evento tipo *outburst*, o incluso el material de la nube donde la estrella se formó. Esta interacción puede haber comprimido y calentado el material, generando las condiciones necesarias para observar el CO en emisión. Otra opción podría ser que el disco de 12 Vul se esté generando debido a la interacción con una compañera evolucionada, y que el sistema esté evolucionando hacia una configuración similar a la observada en algunas estrellas B[e] (Kraus et al., 2016; Liermann et al., 2010; Kourniotis et al., 2018; Torres et al., 2018). En este caso, 12 Vul podría ser un objeto en transición entre un estadio Be y uno B[e].

Para distinguir entre las distintas posibilidades, sería interesante realizar un seguimiento de este objeto con diferentes técnicas. Observaciones realizadas en radio podrían ayudar a detectar la presencia de CO frío rodeando a la estrella central. Por otro lado, la búsqueda de evidencias de una compañera podría aportar información importante para caracterizar mejor este objeto y profundizar nuestra comprensión sobre el origen de esta sorprendente detección.

Agradecimientos: Agradecemos a Gabriel Ferrero y Nidia Morrell, quienes permitieron la obtención de datos en el Observatorio Las Campanas. Y.R.C. agradece a Carnegie Institution for Science y Richard Lounsbery Foundation por la beca otorgada bajo el programa de visitas colaborativas de jóvenes astrónomos argentinos al Observatorio Las Campanas. M.L.A. agradece financiamiento del Programa de Incentivos 11/G160, UNLP. M.K. agradece financiamiento de GA CR (20-00150S) y RVO:67985815. A.G. agradece el apoyo de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina (PICT2017-3790). This project has received funding from the European Union's Framework Programme for Research and Innovation Horizon 2020 (2014-2020) under the Marie Skłodowska-Curie Grant Agreement No. 823734.

Referencias

Baade D., 1982, *A&A*, 105, 65

- Bik A., Kaper L., Waters L.B.F.M., 2006, *A&A*, 455, 561
 Blum R.D., et al., 2004, *ApJ*, 617, 1167
 Chini R., et al., 2012, *MNRAS*, 424, 1925
 Cidale L., et al., 2000, M.A. Smith, H.F. Henrichs, J. Fabregat (Eds.), *IAU Colloq. 175: The Be Phenomenon in Early-Type Stars*, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 214, 472
 Cochetti Y.R., 2019, *Estructura y propiedades físicas de envolturas circunestelares en estrellas Be*, Ph.D. thesis, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata
 Cochetti Y.R., et al., 2021, *A&A*, 647, A164
 Eggen O.J., 1975, *PASP*, 87, 37
 Gledhill T.M., et al., 2011, *MNRAS*, 411, 1453
 Granada A., Arias M.L., Cidale L.S., 2010, *AJ*, 139, 1983
 Hoffleit D., Jaschek C., 1991, *The Bright star catalogue*
 Horch E.P., et al., 2020, *AJ*, 159, 233
 Hubert A.M., Floquet M., Zorec J., 2000, M.A. Smith, H.F. Henrichs, J. Fabregat (Eds.), *IAU Colloq. 175: The Be Phenomenon in Early-Type Stars*, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 214, 348
 Kourniotis M., et al., 2018, *MNRAS*, 480, 3706
 Kraus M., 2009, *A&A*, 494, 253
 Kraus M., et al., 2000, *A&A*, 362, 158
 Kraus M., et al., 2016, *A&A*, 593, A112
 Lefèvre L., et al., 2009, *A&A*, 507, 1141
 Lenorzer A., de Koter A., Waters L.B.F.M., 2002, *A&A*, 386, L5
 Liermann A., et al., 2010, *MNRAS*, 408, L6
 Mennickent R.E., et al., 2009, *PASP*, 121, 125
 Okazaki A.T., 1991, *PASJ*, 43, 75
 Rivinius T., Baade D., Stefl S., 2003, *A&A*, 411, 229
 Rivinius T., Carciofi A.C., Martayan C., 2013, *A&A Rv*, 21, 69
 Sabogal B.E., et al., 2017, *PASP*, 129, 014203
 Scoville N.Z., et al., 1979, *ApJL*, 232, L121
 Smith M.A., 2001, *ApJ*, 562, 998
 Torres A.F., et al., 2018, *A&A*, 612, A113
 Wang L., Gies D.R., Peters G.J., 2018, *ApJ*, 853, 156
 Zorec J., Frémat Y., Hubert A.M., 2000, M.A. Smith, H.F. Henrichs, J. Fabregat (Eds.), *IAU Colloq. 175: The Be Phenomenon in Early-Type Stars*, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 214, 330