

# Modelado de discos de estrellas Be: efecto de truncamiento del disco en la serie de Brackett

Y.R. Cochetti<sup>1,2</sup>, A. Granada<sup>3</sup>, M.L. Arias<sup>1,2</sup>, A.F. Torres<sup>1,2</sup> & C. Arcos<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

<sup>2</sup> Departamento de Espectroscopía, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

<sup>3</sup> Laboratorio de Investigación Científica en Astronomía, UNRN, Argentina

<sup>4</sup> Instituto de Física y Astronomía, Facultad de Ciencias, Universidad de Valparaíso, Chile

Received: 09 February 2024 / Accepted: 05 March 2024

©The Authors 2024

**Resumen** / El espectro infrarrojo de las estrellas Be presenta numerosas líneas de recombinación del hidrógeno. El modelado de las mismas mediante los códigos actualmente disponibles nos permite delimitar los parámetros del disco circunestelar (densidad central, exponente de la ley de densidad, tamaño de la región emisora e inclinación), a partir de la comparación de los espectros sintéticos con los obtenidos observacionalmente. En este trabajo analizamos el efecto de la variación de los parámetros del disco sobre las primeras líneas de la serie de Brackett, utilizando el código HDUST. El modelado de discos de distintos tamaños nos permite estudiar los efectos observables en los espectros debido al truncamiento de las regiones de formación de las líneas.

**Abstract** / The infrared spectra of Be stars present numerous hydrogen recombination lines. Modelling these lines using the available codes allows us to set some constraints to the circumstellar disc's parameters (central density, exponent of the density law, size of the emitting region and inclination), by comparing the synthetic spectra with the observational data. In this work, we analyse how the variation of the disc's parameters affects the first Brackett lines, using the HDUST code. Modelling discs with different sizes allows us to study the observable effects on the spectra due to the truncation of the emitting regions.

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

## 1. Introducción

Los objetos con fenómeno Be son estrellas de tipo espectral B, no supergigantes, que presentan (o han presentado) emisión en líneas del Hidrógeno (ver, por ejemplo, Rivinius et al., 2013, y sus referencias). El modelo actualmente adoptado para explicar las características del fenómeno Be es el de un disco de decreción viscosa. Este modelo incluye una estrella rotando rápidamente, que pierde masa y momento angular. Ese material perdido forma un disco en el ecuador en rotación cuasi-Kepleriana y se aleja lentamente de la estrella por procesos viscosos (Lee et al., 1991; Okazaki et al., 2002). El modelado de diferentes observables, sobre todo en el rango óptico del espectro, ha brindado información relevante sobre los parámetros de estos discos. Por ejemplo, mediante el modelado de la línea H $\alpha$  se ha encontrado que la región emisora de la misma alcanza las decenas de radios estelares (Miroshnichenko et al., 2003; Rivinius et al., 2013; Arcos et al., 2017).

En las últimas décadas, ha ganado importancia el estudio de la región espectral infrarroja (IR) en las estrellas Be. Las líneas observadas en esta región se forman en las regiones más internas del disco y presentan una contribución fotosférica menor que las observadas en el rango óptico. Debido a esto, su análisis nos permite obtener información sobre las propiedades físicas y cinemáticas de la región del disco más cercana a la estre-

lla (Hony et al., 2000; Lenorzer et al., 2002; Mennickent et al., 2009; Granada et al., 2010; Sabogal et al., 2017). Sin embargo, el modelado de las líneas espectrales de la región IR es un campo en el que aún resta mucho por hacer. En este trabajo, presentamos nuestra contribución sobre el modelado de líneas IRs del hidrógeno en estrellas Be, utilizando el código HDUST (Carciofi & Bjorkman, 2006, 2008).

Como primer caso de estudio, comenzamos por analizar la serie de Brackett, desde Br $\alpha$  hasta Br12. Este grupo incluye la línea Br11, que ha sido observada para un gran número de estrellas Be por el relevamiento APOGEE (Chojnowski et al., 2015), y cuyo modelado resulta entonces intrínsecamente interesante para caracterizar un gran número de estrellas Be.

En el trabajo de Cochetti et al. (2023) se analizó la dependencia de las intensidades y formas de las primeras líneas de la serie con los parámetros que describen la estructura del disco, pero manteniendo constante su radio. Para cada modelo, el radio elegido fue el mínimo que incluyera toda la posible región emisora de las líneas. De esta manera, se excluyó la posibilidad de que el disco estuviera truncado. Además, se compararon tales modelos con datos observacionales para las estrellas MX Pup y II Aqr.

En esta oportunidad, nos centraremos en analizar la dependencia con el tamaño del disco, a fin de estudiar el efecto del truncamiento del mismo.

**Tabla 1.** Radios máximos utilizados para cada combinación de  $n$  y  $\rho_0$ . En todos los casos el radio mínimo y el paso fueron de  $10 R_*$ .

$n$	$\rho_0 = 1 \times 10^{-12}$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho_0 = 5 \times 10^{-12}$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho_0 = 1 \times 10^{-11}$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho_0 = 5 \times 10^{-11}$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho_0 = 1 \times 10^{-10}$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
2.5	40 $R_*$	50 $R_*$	—	—	—
3.0	30 $R_*$	30 $R_*$	40 $R_*$	60 $R_*$	—
3.5	30 $R_*$	30 $R_*$	30 $R_*$	40 $R_*$	40 $R_*$
4.0	30 $R_*$				

## 2. Metodología

El código HDUST resuelve las ecuaciones de transporte radiativo, equilibrio radiativo y equilibrio estadístico en una geometría 3D para diferentes distribuciones de velocidad y densidad en el disco. El mismo ha sido utilizado para modelar líneas de hidrógeno en la región óptica del espectro (como por ejemplo H $\alpha$ ) y la distribución espectral de energía (Klement et al., 2017; Marr et al., 2021).

Para la ley de densidad en el disco se utiliza una ley de potencias en la dirección radial y una distribución Gaussiana en la vertical, según

$$\rho(r, z) = \rho_0 \left( \frac{r}{R_*} \right)^{-n} \exp\left(-\frac{z^2}{2H^2}\right), \quad (1)$$

donde  $R_*$  es el radio estelar y  $H$  es la altura de escala correspondiente a un disco verticalmente isotermo.

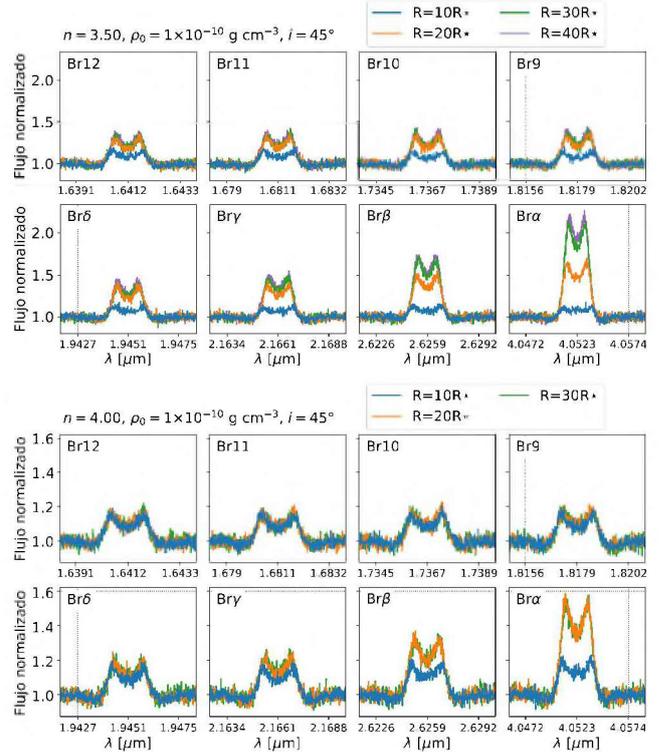
Los parámetros que variamos para este trabajo fueron el exponente  $n$ , la densidad base  $\rho_0$  y la extensión del disco  $R$  para analizar los efectos del truncamiento. Según Vieira et al. (2017), el valor del parámetro  $n$  está relacionado con diferentes estados del disco: un disco en disipación presenta una caída suave en la densidad, con valores  $n \lesssim 3$ ; el rango  $3 \lesssim n \lesssim 3.5$  corresponde a discos estables; mientras que valores  $n \gtrsim 3.5$  están relacionados a discos en formación con una caída rápida en la densidad.

Para cada modelo, los espectros fueron simulados para inclinaciones en el rango  $0-90^\circ$  con un paso de  $15^\circ$ . Consideramos una estrella de masa  $M=10 M_\odot$ , radio polar  $R_{\text{pole}} = 5.5 R_\odot$ , luminosidad  $L=7500 L_\odot$ , y  $W=V_{\text{rot}}/V_{\text{orb}} = 0.7$  (siendo  $V_{\text{rot}}$  la velocidad de rotación en el ecuador y  $V_{\text{orb}}$  la velocidad orbital Kepleriana). Esto corresponde a una estrella de tipo B temprana con  $T_{\text{eff}} \approx 24250 \text{ K}$  y  $V_{\text{rot}} \approx 370 \text{ km s}^{-1}$ .

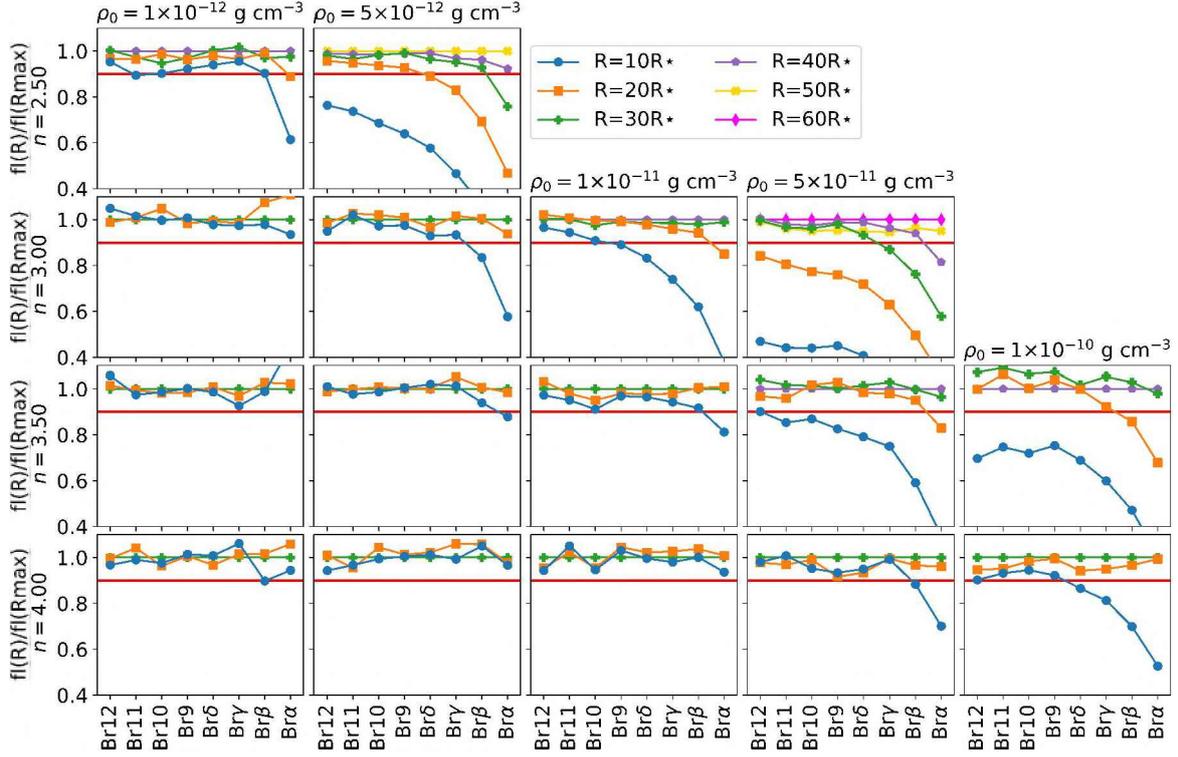
En la Tabla 1 se lista el radio máximo del disco para cada combinación de parámetros utilizada en los modelos. En todos los casos, el radio mínimo y el paso fueron de  $10 R_*$ .

## 3. Resultados

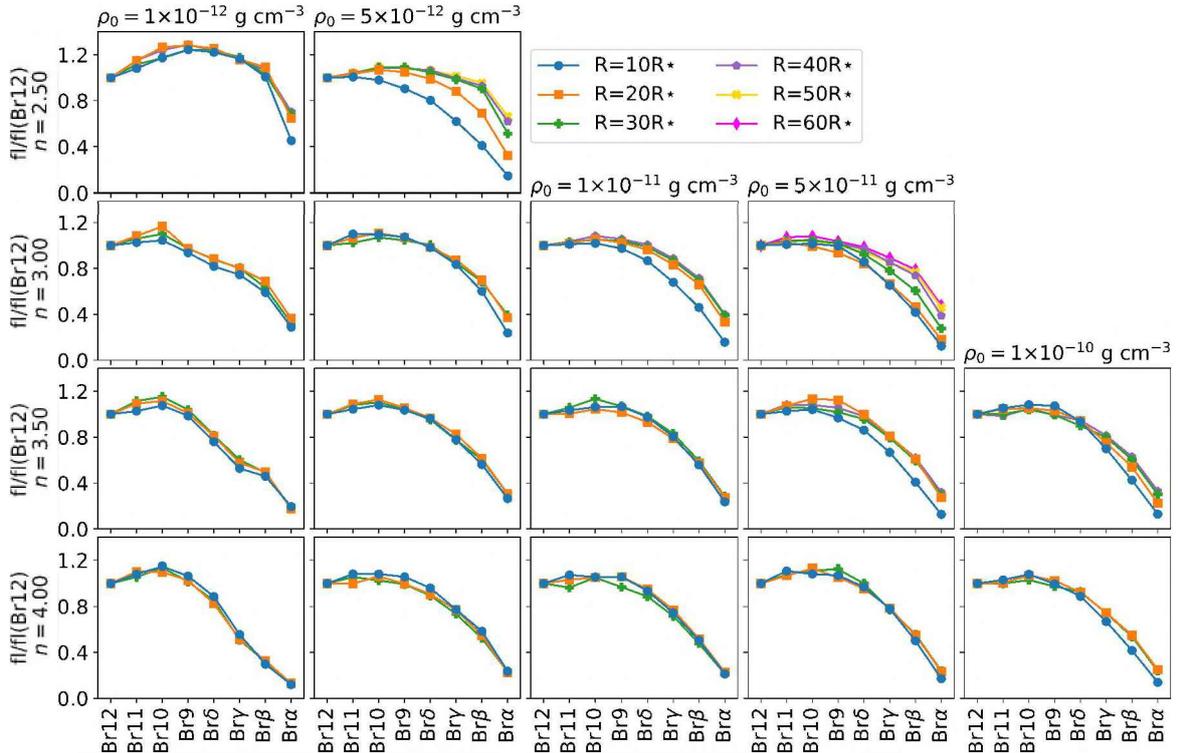
En la Fig. 1 presentamos, a modo de ejemplo, los perfiles de líneas para  $\rho_0 = 1 \times 10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$ ,  $i = 45^\circ$ , y para dos valores de  $n$ : 3.5 y 4. Vemos que el efecto del truncamiento depende tanto del parámetro  $n$  como de la línea. Para el menor  $n$ , podemos observar diferencias en las intensidades en todas las líneas analizadas, mientras que para el mayor  $n$ , el efecto no es perceptible en los miembros más altos de la serie. Para poder realizar una mejor comparación, medimos los flujos de cada línea.


**Fig. 1.** Perfiles de líneas para  $\rho_0 = 1 \times 10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$ ,  $i = 45^\circ$ , y para dos valores de  $n$ : 3.5 (*panel superior*) y 4 (*panel inferior*).

En la Fig. 2, cada columna y fila de gráficos corresponde a un valor de  $\rho_0$  y  $n$ , respectivamente. Cada curva muestra el cociente entre el flujo obtenido en cada línea para un dado valor  $R$  del radio del disco, y el flujo obtenido en esa misma línea para el mayor radio considerado para esos  $\rho_0$  y  $n$ . Aunque la Fig. 2 corresponde al caso  $i = 45^\circ$ , los comportamientos para otras inclinaciones resultan muy similares al mostrado. La línea roja indica un valor del 90% del flujo obtenido para el radio máximo. Podemos observar que para los primeros miembros de la serie (Br $\alpha$ , Br $\beta$ , Br $\gamma$ ), la diferencia en los flujos para los distintos  $R$  es significativa para casi todos los modelos. En cambio, para los miembros más altos modelados, la diferencia sólo es notoria en los casos con mayor densidad  $\rho_0$  y/o menor  $n$  (caída más suave de la densidad). Esto está de acuerdo con el hecho de que los primeros miembros de la serie se forman en regiones más extensas, por lo que el truncamiento del disco afectará significativamente al flujo emitido. En cambio, los miembros más altos de la serie se forman en una región



**Fig. 2.** Cociente entre el flujo de línea correspondiente a cada radio R y el obtenido considerando el radio máximo de cada modelo. La línea roja indica un 90% del flujo correspondiente al radio máximo.



**Fig. 3.** Cociente entre el flujo de cada línea y el correspondiente a Br12.

más interna, por lo que el efecto del truncamiento no será tan importante.

Para analizar el comportamiento de los flujos a lo largo de la serie, tomamos como referencia el flujo de Br12 y hacemos el cociente  $f_l/f_l(\text{Br12})$  (ver Fig. 3). De manera análoga a la Fig. 2, cada gráfico corresponde a una combinación  $\rho_0$  y  $n$ , y cada curva a un R considerado. En todos los casos hay un incremento en el cociente comenzando desde los miembros más altos, y luego una caída marcada. Las diferencias en las curvas para cada R son relevantes solo para altos  $\rho_0$  y/o bajos  $n$ . En esos casos, la caída del flujo es más marcada para R menores.

#### 4. Conclusiones

Los diferentes efectos del truncamiento, según el estado evolutivo del disco, serán los siguientes:

- Los discos estables o en disipación serán los más afectados por posibles truncamientos del disco. Esto es debido a que la densidad disminuye suavemente (tienen valores de  $n$  menores), permitiendo que la región emisora de las líneas llegue a una distancia mayor. Si ese disco es truncado, la cantidad de flujo perdida será significativa. Esto es aún más relevante para densidades centrales  $\rho_0$  mayores.
- Los discos en formación se verán afectados solamente si la densidad es lo suficientemente alta, ya que la densidad decae rápidamente (valores altos de  $n$ ). Esto hace que el truncamiento solo elimine regiones del disco poco densas y con poca contribución en la emisión de las líneas.

Además, para una densidad dada  $\rho_0$  y exponente  $n$ , el efecto del truncamiento afectará más a los primeros miembros de la serie. Esto se debe a que los mismos se forman en una región más extensa, por lo que la reducción de la región potencialmente emisora representa una pérdida de flujo significativa.

Actualmente nos encontramos trabajando en la incorporación de más líneas de la serie de Brackett, así como también líneas de otras series observadas en el IR (Humphreys, Pfund y Paschen). Luego extenderemos nuestro estudio a estrellas B de otros subtipos espectrales. Esto nos permitirá avanzar en la caracterización de las envolturas, a partir de la comparación de los espectros sintéticos con los obtenidos observacionalmente.

*Agradecimientos:* CA agradece al proyecto Fondecyt Regular N 1230131. MLA y AFT agradecen financiamiento del Proyecto PIP 1337 (CONICET) y del Programa de Incentivos 11/G160 (UNLP). AG agradece al proyecto PIBAA 28720210100879CO. Este proyecto ha recibido financiación dentro del marco del Programa de Investigación e Innovación Horizonte 2020 (2014-2020) de la Unión Europea en virtud del Acuerdo de subvención Marie Skłodowska-Curie No. 823734. Agradecemos al árbitro, Carlos Saffe, por la lectura del artículo y las sugerencias realizadas.

#### Referencias

- Arcos C., et al., 2017, ApJ, 842, 48  
 Carciofi A.C., Bjorkman J.E., 2006, ApJ, 639, 1081  
 Carciofi A.C., Bjorkman J.E., 2008, ApJ, 684, 1374  
 Chojnowski S.D., et al., 2015, AJ, 149, 7  
 Cochetti Y.R., et al., 2023, Galaxies, 11, 90  
 Granada A., Arias M.L., Cidale L.S., 2010, AJ, 139, 1983  
 Hony S., et al., 2000, A&A, 355, 187  
 Klement R., et al., 2017, A&A, 601, A74  
 Lee U., Osaki Y., Saio H., 1991, MNRAS, 250, 432  
 Lenorzer A., de Koter A., Waters L.B.F.M., 2002, A&A, 386, L5  
 Marr K.C., et al., 2021, ApJ, 912, 76  
 Mennickent R.E., et al., 2009, PASP, 121, 125  
 Miroshnichenko A.S., et al., 2003, A&A, 408, 305  
 Okazaki A.T., et al., 2002, MNRAS, 337, 967  
 Rivinius T., Carciofi A.C., Martayan C., 2013, A&A Rv, 21, 69  
 Sabogal B.E., et al., 2017, PASP, 129, 014203  
 Vieira R.G., et al., 2017, MNRAS, 464, 3071