



Estrellas B con líneas en emisión: Enigmas y dilemas

L.S. Cidale^{1,2}

¹ *Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET–UNLP, Argentina*

² *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina*

Contacto / lydia@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / A lo largo de esta contribución describiré el estado actual y la problemática de algunos grupos de estrellas B con líneas en emisión, particularmente las estrellas Be y las B[e]. ¿Qué propiedades tienen estas estrellas? ¿Alcanzan las mismas a rotar a la velocidad crítica? ¿Qué características tienen sus discos circunestelares? ¿Sabemos cómo se forman y evolucionan dichos discos? Para tratar la compleja problemática que caracteriza a estas estrellas, nuestro grupo de investigación abordó el problema usando múltiples técnicas de observación con alta resolución espacial, espectral y temporal. Al mismo tiempo, empleamos modelos de vientos estelares, donde la presión de radiación juega un papel importante en el proceso de pérdida de masa, y modelos con rotación para interpretar la formación y disipación de los discos circunestelares.

Abstract / Throughout this review I will describe the current state and open issues of some B emission line star groups, particularly the Be and B[e] stars. What are the properties of these stars? Do they rotate at the critical speed? What characteristics do their circumstellar gaseous and dusty discs show? Do we know how these discs are formed and evolve? To deal with the complex phenomena that characterize these stars, our research group addressed them using multiple observation techniques with high spatial, spectral and temporal resolution. Furthermore, to interpret the formation and dissipation of circumstellar discs, we used non-rotating and rotating stellar wind models, where the radiation pressure and rotation play an important role in the mass-loss process.

Keywords / stars: emission-line, Be — stars: fundamental parameters — circumstellar matter — stars: mass-loss

1. Introducción

Las estrellas Be son objetos de tipo espectral B que presentan, o han presentado alguna vez, las líneas de hidrógeno en emisión (Jaschek & Egret, 1982). El origen de estas emisiones es atribuido a la presencia de un disco circunestelar gaseoso formado como consecuencia de la rápida rotación de la estrella (Struve, 1931). Si bien la alta rotación ha sido propuesta como el mecanismo principal para explicar la transferencia de masa y momento hacia el disco, no hay evidencias de que las estrellas Be puedan llegar a rotar a velocidades cercanas a la velocidad crítica de rotación (cf. Zorec et al., 2016). Por otra parte, las estrellas Be suelen presentar variaciones espectroscópicas o fotométricas vinculadas a pulsaciones estelares, manchas estelares, o campos magnéticos, pudiendo, en ocasiones, presentar eventos de formación o disipación del disco (cf. Rivinius et al., 2013).

Dentro del grupo de las estrellas B con líneas en emisión también encontramos a las estrellas B[e]. Estas estrellas, a igual que las Be, muestran líneas en emisión de H y de metales una vez ionizados, pero presentan además líneas prohibidas (ver Fig. 1) y fuertes excesos IR originados por la presencia de polvo. El fenómeno B[e] es una propiedad intrínseca del medio circunestelar que rodea a la estrella. Se observa tanto en objetos de presecuencia y secuencia principal como en objetos evolucionados, aunque también en algunas binarias in-

teractuantes (cf. Lamers et al., 1998).

En particular, las estrellas supergigantes B[e] (SgB[e]) muestran un espectro híbrido: líneas de resonancia de elementos altamente ionizados (CIV, NV, OVI), con velocidades de expansión entre 300 y 500 km s⁻¹, y líneas de metales una vez ionizados con velocidades de ~ 30 km s⁻¹. Se observan además bandas moleculares de TiO, CO (Zickgraf et al., 1985; Oksala et al., 2013) y, a veces, SiO (Kraus et al., 2014), y fuertes excesos IR producidos por polvo (Kastner et al., 2010; Lee et al., 2016). Para interpretar estas observaciones, Zickgraf et al. (1986) propusieron que los elementos altamente ionizados se originarían en un viento rápido, localizado en las regiones polares, y los elementos de baja ionización, a igual que las moléculas y el polvo, se formarían en regiones frías ubicadas en el plano ecuatorial (ver Fig. 2).

2. Objetivos

Para discutir el estado evolutivo y los procesos físicos que ocurren en las estrellas con líneas en emisión es importante contar con una determinación confiable de los parámetros estelares y así tener una ubicación precisa de estas estrellas en un diagrama de Hertzsprung–Russell (HR). Esta tarea suele ser difícil a la hora de modelar el espectro estelar debido a la presencia de las envolturas circunestelares que ocultan las características del objeto

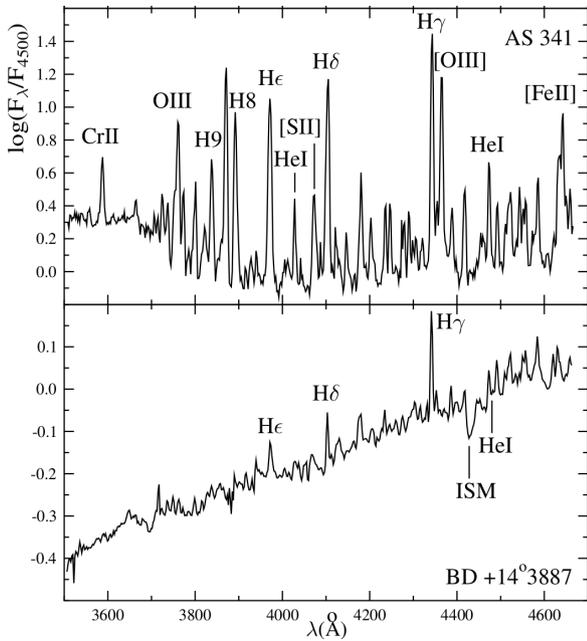


Figura 1: Espectro de emisión de dos estrellas con fenómeno B[e] (AS 324, Panel Superior y BD +14 3887, Panel Inferior). La escala de flujo está normalizada al valor del flujo en 4500 Å. Adaptación de una figura extraída de Cidale et al. (2001).

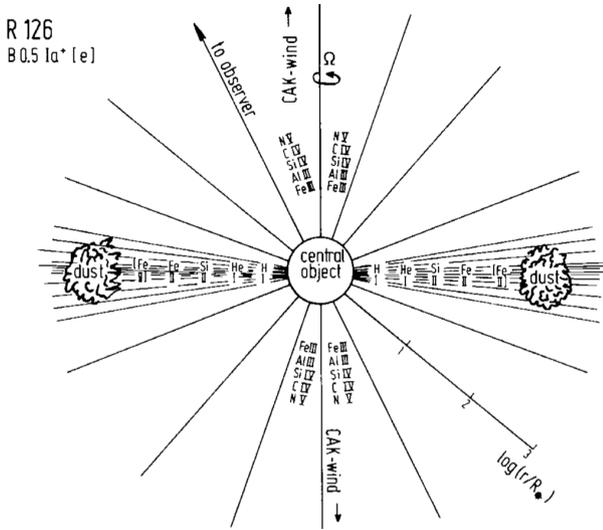


Figura 2: Modelo de envoltura circunestelar de una estrella SgB[e]. El polvo, las moléculas y los elementos de baja ionización se concentran hacia las regiones ecuatoriales. Figura extraída de Zickgraf et al. (1986).

central. Las incertezas en los parámetros estelares, sumadas a otros efectos tales como el oscurecimiento gravitatorio y los apartamientos de la simetría esférica, suelen conducir a determinaciones erróneas de los parámetros fundamentales y del estado evolutivo de estas estrellas (Zorec et al., 2016, 2017). Otro tema de interés es el estudio de la formación de envolturas circunestelares y el modelado del espectro emergente.

A lo largo de mi carrera me he dedicado principal-

mente a:

- La determinación de parámetros estelares.
- El modelado de la estructura de las envolturas circunestelares y las transiciones de líneas y moléculas.
- El modelado del viento estelar.

3. Parámetros fundamentales y el sistema de clasificación BCD

En los años 90, comencé a trabajar en el problema de la determinación de los parámetros fundamentales de las estrellas B con líneas en emisión. Surgió así la iniciativa de utilizar el sistema espectrofotométrico de clasificación espectral desarrollado por Barbier, Chalonge y Diván (Barbier & Chalonge, 1941; Chalonge & Divan, 1952, 1973; Divan, 1979), conocido como el sistema BCD.

En 1991, los Dres A. Ringuelet y J. Sahade me contactaron con la Dra. N. Sánchez, quien visitaba Argentina. En esa oportunidad ella se encontraba organizando la primera escuela “*Current topics in astrophysical physics: 1st course: Erice, Italy*”. En dicha escuela se inauguraba una muestra en homenaje a D. Chalonge y se exhibían las maquetas del sistema BCD (ver Fig. 3). Presenté entonces mi solicitud y asistí a la misma. Tuve allí el honor de conocer al Dr. S. Chandrasekhar y, también, a Mme. L. Diván, coautora del sistema BCD. Fue ella quien me asesoró sobre las ventajas y dificultades del uso del sistema BCD, sobre la sensibilidad del método a las características del espectrógrafo y sus calibraciones.

El sistema espectrofotométrico BCD se basa en la medición directa de la altura del salto de Balmer (D_*) en una escala logarítmica (ver panel superior de la Fig. 4) y la distancia del punto medio de la envoltura superior de las últimas líneas de Balmer respecto a la coordenada λ_{10} (parámetro $\lambda_1 - 3700$ Å). Una característica llamativa que puede observarse en algunas estrellas B con líneas en emisión, es la presencia de una segunda componente del salto de Balmer. Esta segunda componente puede estar en emisión o en absorción, como se observa en los paneles medio e inferior de la Fig. 4, y se origina en una región de la atmósfera con menor densidad que la que presenta la fotosfera (Divan, 1979).

Empleando estrellas estándares, Zorec (1986); Zorec & Briot (1991); Zorec et al. (2009) mejoraron las calibraciones del sistema BCD, lo que permite determinar la temperatura efectiva, la gravedad superficial (T_{eff} , $\log g$), y las magnitudes visuales y bolométricas (M_V y M_{Bol}). La principal ventaja del sistema BCD es que los parámetros (D_* , λ_1) están libres de enrojecimiento (Zorec & Briot, 1991). Por otra parte, de la pendiente del continuo de Balmer (Φ_B) es posible estimar el exceso de color $E(B - V)$ y, por lo tanto, la absorción interestelar y circunestelar.

Contacté al Dr. J. Zorec, un gran especialista en el tema, quién me enseñó a usar dicho método. Decidimos entonces contrastar las mediciones realizadas con el espectrógrafo B&C de CASLEO con las calibraciones ya existentes del sistema BCD. Solicitamos entonces un turno en 1997 y otro en 1998. Hicimos las pruebas correspondientes, que resultaron muy exitosas, y aplicamos el método a varias estrellas B[e]. Continuamos adquirien-



Figura 3: Muestra sobre D. Chalonge, Erice 1991 (Italia).

do datos espectroscópicos entre los años 2001 y 2004, y entre 2011 y 2017. A partir de 2003, nuestra investigación se inclinó también hacia el estudio de cientos de estrellas de campo tipo Be, Bn, B peculiares (Bp), B supergigantes, y estrellas Be de cúmulos abiertos.

Los resultados obtenidos dieron lugar a numerosas publicaciones, tesis doctorales y de licenciatura. Entre los resultados más destacados se pueden mencionar:

- Determinación de los parámetros fundamentales de 16 estrellas B[e] (Cidale et al., 2001).
- Nuevas calibraciones BCD de temperaturas efectivas y tipos espectrales para estrellas B, en especial para supergigantes (ver Fig. 5, Zorec et al., 2009).
- Estudio de parámetros fundamentales y estado evolutivo de estrellas peculiares en He. Las estrellas ricas en He son la contraparte caliente de las deficientes en He (ver Fig. 6, Cidale et al., 2007).
- Determinación de parámetros estelares, distancias, enrojecimientos, edades y memberships de 221 estrellas B en 11 cúmulos abiertos Aidelman et al. (2012, 2015, 2018). La Fig. 7 muestra un ejemplo, el diagrama HR de NGC 6087.
- Descubrimiento de excesos de color anómalos en estrellas B tardías (Aidelman et al., 2015).
- Detección de una secuencia evolutiva de formación de estrellas con discos y líneas en emisión (Be) y sin líneas en emisión (B_{dd}), ver Fig. 8.
- Estudio estadístico de la distribución de estrellas Be y Bn (sin líneas en emisión), donde se muestra que las estrellas Bn son la contraparte fría de las estrellas Be (ver Fig. 9, Cochetti et al., 2020).

4. Espectroscopía óptica e IR

Mis primeras líneas de investigación se enfocaron en el estudio de las estrellas Be en el rango UV con la finalidad de caracterizar sus envolturas circunestelares (Cidale & Ringuelet, 1989). Posteriormente, a partir del modelado del espectro óptico de FeII, encontramos que el material del disco podía extenderse hasta las regiones polares en la cercanía de la estrella (Arias et al., 2006; Zorec et al., 2007). Paulatinamente mi interés migró hacia la región del infrarrojo (IR), empleando las facilidades

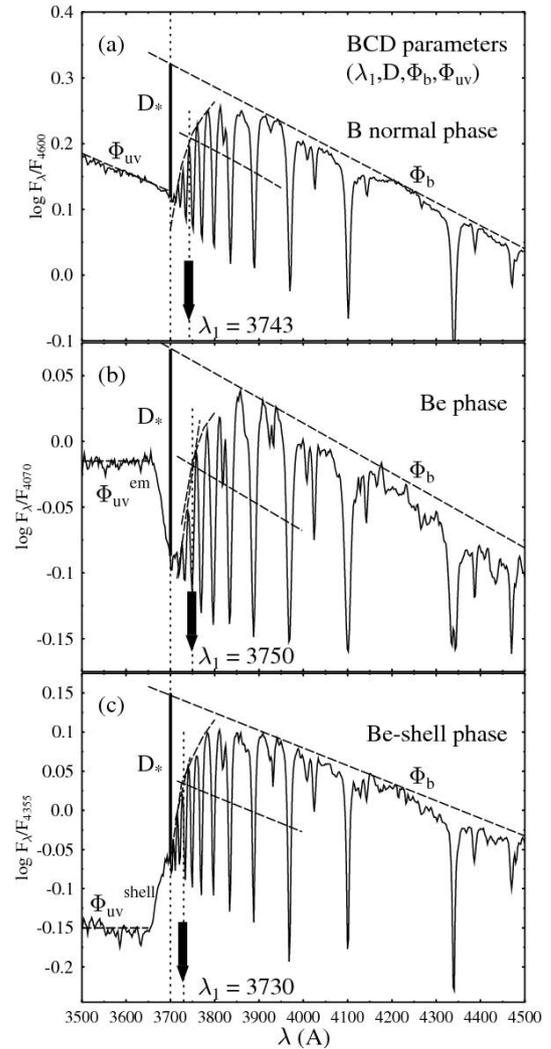


Figura 4: Parámetros BCD (D_* , λ_1 , Φ_b). Panel Superior: el salto de Balmer que representa las condiciones físicas de la fotosfera. Panel Medio: el salto muestra una segunda componente en emisión. Panel Inferior: la segunda componente del salto de Balmer está en absorción. Figura extraída de Aidelman et al. (2012).

instrumentales del Observatorio Gemini y, más recientemente, la técnica de interferometría óptica.

El infrarrojo cercano constituye una herramienta muy valiosa para el estudio de las envolturas de las estrellas Be y B[e]. En esta región espectral se observan líneas de recombinación de las series de Brackett, Pfund y Humphreys (ver Fig. 10). La intensidad relativa de las líneas de cada serie provee un criterio de clasificación de las propiedades ópticas de sus envolturas/discos. En base a este criterio, encontramos tres grupos de espectros (Mennickent et al., 2009; Granada et al., 2010) que pueden relacionarse con distintos estadios evolutivos, fases que se corresponden a procesos de formación o disipación de los discos (ver Sec. 4.2.).

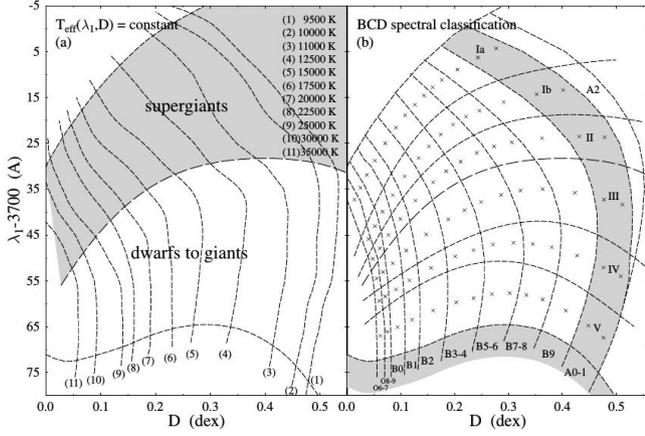


Figura 5: Calibraciones de parámetros BCD a T_{eff} y tipo espectral. Panel Izquierdo, las líneas a trazos representan curvas a T_{eff} constante. Panel Derecho, las cajas con líneas a trazos vinculan los parámetros BCD con el sistema de clasificación MK. Extraído de Zorec et al. (2009).

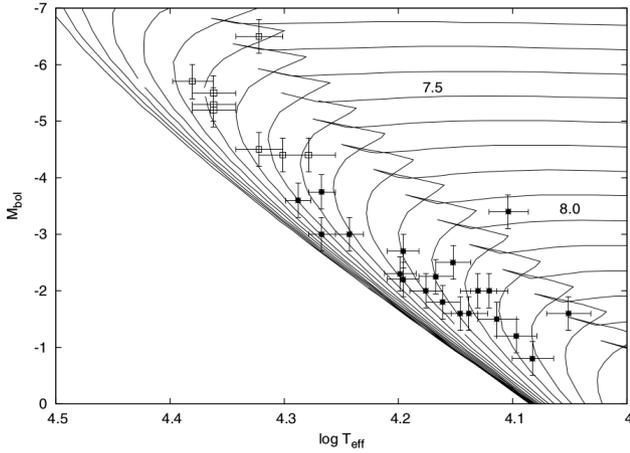


Figura 6: Diagrama HR de estrellas ricas en He (símbolos cuadrados, parte superior) y deficientes en He (símbolos redondos, parte inferior). Las isocronas fueron tomadas de Bressan (1993). Extraído de Cidale et al. (2007).

4.1. Modelado de discos circunestelares. Estado evolutivo de las estrellas B[e]

El modelado de la emisión molecular resulta importante para analizar la cinemática de los discos de las estrellas B[e]. En base a técnicas de espectroscopía IR, encontramos discos de CO alrededor de varias estrellas B[e] galácticas y del grupo local, con temperaturas entre 2000 y 3000 K. Para determinar el estado evolutivo de una estrella hemos utilizado la técnica del modelado de la emisión de ^{13}CO presente en el espectro IR (ver Fig. 11 Oksala et al., 2013). Hemos detectado también algunas supergigantes B[e] con bandas de SiO en emisión (Kraus et al., 2015a). Estos discos se observan en rotación Kepleriana y, en ocasiones, la distribución de densidad revela estructuras de anillos concéntricos o porciones de anillos. Hemos reportado estrellas variables en el rango óptico y en CO (i.e. LHA 120-S18 y LHA 120-S35, Torres et al., 2012; Torres et al., 2018). En

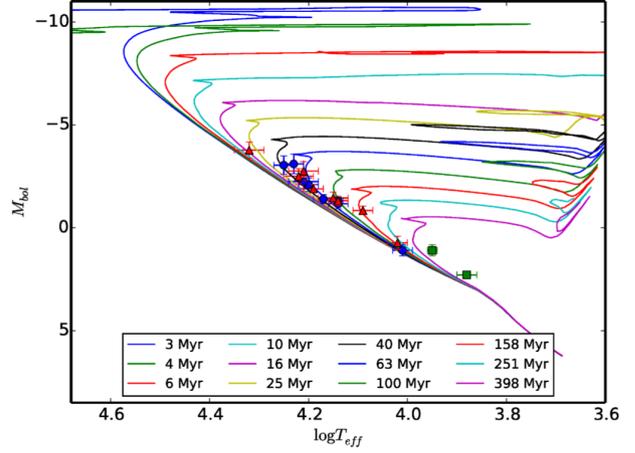


Figura 7: Diagrama HR de NGC 6087. La edad estimada para el cúmulo es de 55×10^6 años. Miembros y probables miembros se representan con círculos azules, los no miembros con cuadrados verdes, y las estrellas Be con triángulos rojos. Las isocronas fueron tomadas de Ekström et al. (2012). Extraído de Aidelman et al. (2018).

el caso particular de LHA 120-S73 (Kraus et al., 2016), la estructura y variabilidad observada podría estar asociada con el paso de pequeños cuerpos rocosos, planetas de segunda generación, originados en la fase posterior a gigante roja. También hemos detectado la aparición y desaparición de discos de CO en lapsos de tiempo menor a un año (i.e., en LHA 120-S65 y MWC 84, Oksala et al., 2012; Liermann et al., 2014).

En el rango óptico, a partir del modelado de OI y CaII, observamos que el disco gaseoso también presenta estructuras anulares (Maravelias et al., 2018; Torres et al., 2018). Aunque el resultado más curioso fue haber detectado la emisión Raman en una supergigante B[e] azul (Torres et al., 2012), emisión que sólo había sido observada en estrellas simbióticas. La emisión Raman es un excelente trazador de discos circunestelares de HI.

4.2. Interferometría óptica

En 2010 iniciamos un proyecto de cooperación con los Dres. O. Chesneau, S. Kanaan, M. Borges Fernandes, M. Kraus y M. Curé para realizar observaciones con el *Very Large Telescope* (VLT, ESO) y los interferómetros MIDI (*mid-infrared interferometric instrument*) y AMBER (*Astronomical Multi-Beam Recombiner*). El objetivo era determinar el tamaño de los discos de gas y polvo de dos SgB[e]. Estas observaciones nos permitieron resolver el disco de polvo de CPD-42 5943 (Cidale et al., 2012), el cual presenta un borde nítido interno a 14 UA de la estrella. Combinando estos datos con espectros IR, encontramos que el disco de CO es interior al disco de polvo y se encuentra en rotación Kepleriana.

Un segundo trabajo se enfocó en el estudio de 26 estrellas Be (Cochetti et al., 2019), usando datos de VLTI/AMBER. Logramos determinar parámetros físicos y cinemáticos de los discos de 18 estrellas que presentan la línea Br γ en emisión. Para modelar un disco

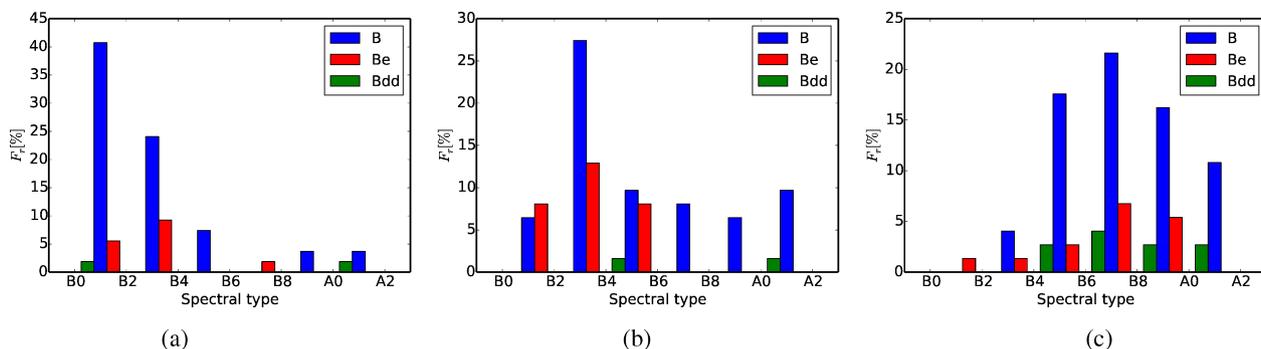


Figura 8: Distribución de estrellas Be y B_{dd} (sin líneas de emisión) por tipo espectral y por edad: a) entre 3×10^6 y 10^7 años, b) entre 10^7 y 4×10^7 años y c) mayor a 4×10^7 años. Existe una correlación entre la frecuencia del tipo espectral de las estrellas Be y la edad del cúmulo. Extraído de Aidelman et al. (2018).

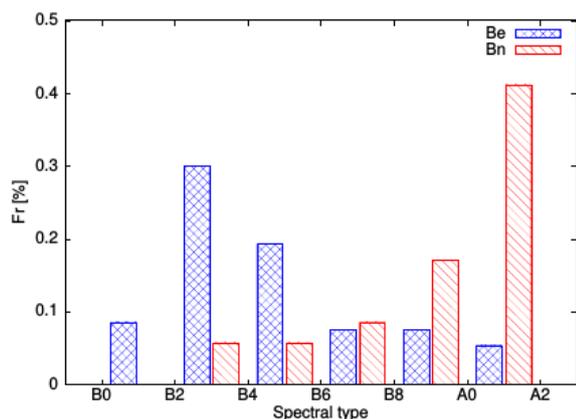


Figura 9: Distribución de estrellas Be y Bn por tipo espectral. Las estrellas Bn completan en número la contraparte fría de las estrellas Be. Extraído de Cochetti et al. (2020).

ecuatorial con rotación empleamos el modelo cinemático 2D (Delaa et al., 2011). Los radios de los discos medidos oscilan entre 2 y $13 R_*$. En casi todos los casos, los discos están en rotación Kepleriana, a excepción de un objeto (HD 28497) al que fue necesario agregarle un brazo espiral de sobredensidad. Este estudio permitió también derivar las velocidades intrínsecas de rotación de las estrellas, al poder separar el valor de $V \sin i$ del ángulo de inclinación del eje de rotación. De los resultados concluimos que los ejes de rotación de las estrellas Be están distribuidos al azar en el plano del cielo. Encontramos, además, que las mismas rotan a $V/V_c = 0.75 \pm 0.08$ (donde V_c es la velocidad crítica de rotación), es decir con una tasa de rotación media de $\Omega/\Omega_c = 0.90 \pm 0.05$. Los valores obtenidos coinciden con los encontrados por Cranmer (2005); Frémat et al. (2005); Zorec et al. (2016), quienes como nosotros sostienen que las estrellas Be no rotan a la velocidad crítica. Del análisis realizado también encontramos que no existe correlación entre V/V_c y el tamaño del disco medido, ni tampoco hay correlación con el tipo espectral de la estrella. Sin embargo, a partir de la ubicación de estrellas con discos estables (Fig. 12), encontramos una cota máxima para el tamaño del disco gaseoso (definida por la recta diagonal superior) que depende de la velocidad de rotación en la base del disco.

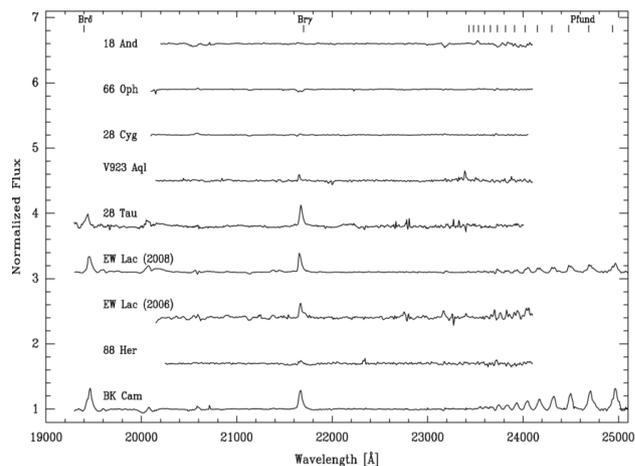


Figura 10: Espectros IR de estrellas Be obtenidos con GNIRS. Extraído de Granada et al. (2010).

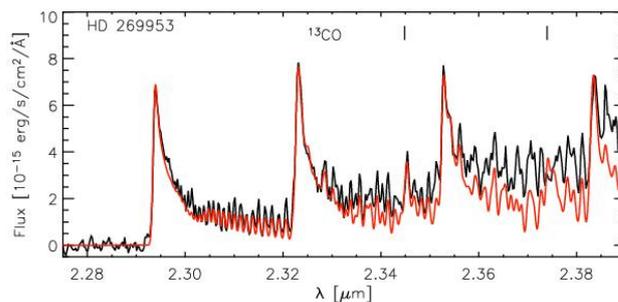


Figura 11: Modelado de la emisión molecular de ^{12}CO y ^{13}CO . Extraído de Oksala et al. (2013).

No obstante, la rotación por sí sola no es suficiente para explicar la formación del disco, por lo que es necesario considerar otros mecanismos.

5. Vientos estelares y transporte de radiación

Nuestros primeros trabajos, tenían como finalidad modelar el exceso IR y el espectro de las estrellas tempranas, empleando leyes empíricas de velocidad y temperatura (Cidale & Ringuet, 1993; Vazquez et al., 1993; Ci-

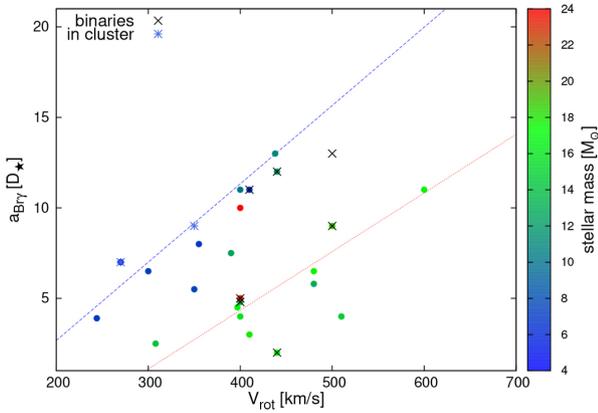


Figura 12: Correlación entre el diámetro del disco en B_{BD} (en unidades de diámetros estelares) y la velocidad de rotación de las estrellas Be. La recta diagonal indica una cota superior. El color de los símbolos representa la masa estelar. Extraído de Cochetti et al. (2019).

dale & Vazquez, 1995; Cidale, 1998; Venero et al., 2002). Buscamos explicar si una cromosfera en expansión era capaz de reproducir el exceso infrarrojo observado en las estrellas Be (ver Fig. 13) o la emisión de las líneas de H y He II de las estrellas O y B. Estos estudios nos motivaron a que comenzáramos a trabajar en la búsqueda de nuevas soluciones hidrodinámicas que justificaran los resultados que habíamos encontrado con nuestros modelos ad-hoc.

La teoría clásica de vientos impulsados por radiación predice velocidades monótonamente crecientes con el radio para cualquier valor de la tasa de rotación (Castor et al., 1975, CAK). Sin embargo, cuando se considera la corrección por el tamaño finito del disco estelar (Pauldrach et al., 1986; Friend & Abbott, 1986, m-CAK) se encuentra que no es posible hallar una solución tipo transónica en el plano ecuatorial si la velocidad de rotación es muy alta, es decir $V > 0.6 V_c$. La solución a este problema fue hallada por Curé (2004) quien encontró una nueva solución hidrodinámica cuando $V > 0.75 V_c$. Esta nueva solución Ω -lenta (ver Fig. 14, secuencia de curvas con menor gradiente) predice un flujo de materia con una aceleración menor que la que resulta de las teorías CAK y m-CAK (denominadas soluciones rápidas). Esto sugiere que una estrella con alta rotación, además de deformarse, podría presentar los dos regímenes de velocidades. A partir de una determinada latitud la solución rápida dejaría de existir y surgiría un viento lento hacia las regiones ecuatoriales (Curé et al., 2005). El contraste de densidad entre el polo y el ecuador daría lugar a la formación de discos extremadamente densos, como los de las estrellas B[e].

Recientemente, en Araya et al. (2018), encontramos regiones de coexistencia de soluciones rápidas y lentas (Fig.14). Es decir, ante una perturbación, o inestabilidad, se produciría un cambio en el régimen del viento. La interacción del viento lento con el rápido, o viceversa, daría lugar a la formación o disipación de un disco.

De la colaboración científica con el Dr. M. Curé, encontramos que valores altos del parámetro δ de la fuerza de radiación, que indica un cambio en la ionización del

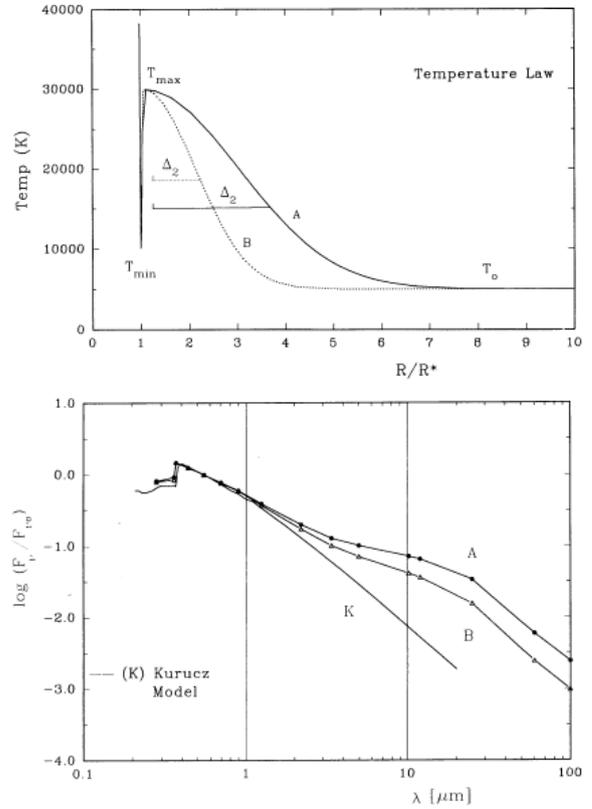


Figura 13: Distribución de temperatura tipo cromosférica para diferentes extensiones Δ_2 (Panel Superior), propuestas para modelar la emisión de continuo de las estrellas tempranas (Panel Inferior). Extraído de Vazquez et al. (1993).

viento, también conducen a soluciones hidrodinámicas lentas capaces de reproducir el comportamiento de la velocidad terminal de las supergigantes A (Curé et al., 2011) y de describir la línea $H\alpha$ de algunas supergigantes B (Venero et al., en preparación). Las propiedades de las soluciones Ω -lenta y δ -lenta están descritas en Venero et al. (2016); Cidale (2018), quienes encuentran la existencia de una brecha donde no hay una solución estacionaria y predominan los procesos dependientes del tiempo. Este es un tema que amerita estudiarse profundamente.

Desde el punto de vista observacional, modelamos los vientos de 18 estrellas B supergigantes. Encontramos que las mismas presentan regímenes rápidos o lentos, y éstas se ubican a cada lado del salto de biestabilidad (ver Fig. 15, Haucke et al., 2018), mientras que las estrellas más variables se ubican dentro del salto. Por otro lado, encontramos que la variabilidad observada en las líneas fotosféricas de 55 Cyg condice con pulsaciones radiales en modo extraño, y que la variabilidad observada en $H\alpha$ indica variaciones en la pérdida de masa, \dot{M} , en un factor 2. Este resultado sugiere un vínculo entre las pulsaciones y la variabilidad de \dot{M} (Kraus et al., 2015b).

6. Conclusiones

Para tratar la compleja problemática que caracteriza a las estrellas con líneas en emisión, nuestro grupo de in-

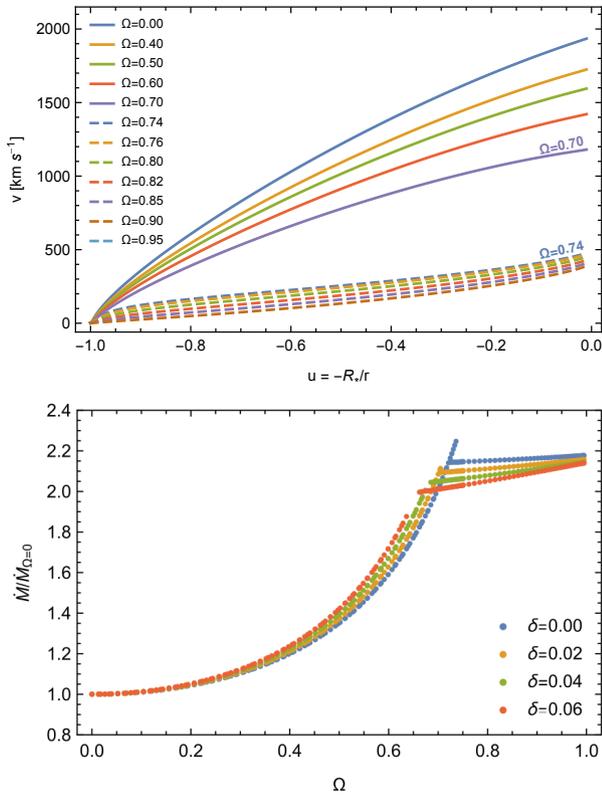


Figura 14: Panel Superior: soluciones de vientos impulsados por radiación. Regímenes de velocidad rápido ($\Omega = V/V_c < 0.7$) y lento ($\Omega > 0.73$). Panel Inferior: coexistencia de soluciones rápidas y lentas en el rango $0.65 < V/V_c < 0.75$ para diferentes valores de δ , parámetro que describe la variación de la ionización en el viento. Figuras extraídas de Araya et al. (2018).

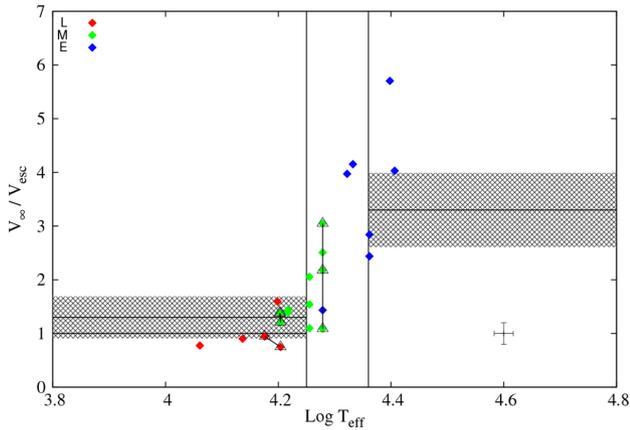


Figura 15: Comportamiento del viento en la región del salto de biestabilidad (región de temperaturas efectivas delimitada por las líneas verticales). Las bandas grises muestran el rango de variación de la velocidad terminal, V_∞ . Las estrellas se identifican por su tipo espectral: B tempranas (en azul), B intermedias (en verde) y B tardías (en rojo). Figura extraída de Haucke et al. (2018).

vestigación abordó el problema usando múltiples técnicas de observación con alta resolución espacial, espectral y temporal. Trabajamos además en el modelado de

las líneas espectrales mediante simulaciones numéricas de transporte de radiación fuera de ETL en medios en movimiento. Con el objetivo de mejorar los modelos de transporte de radiación, estudiamos las propiedades hidrodinámicas de los vientos impulsados por radiación. En cada uno de estos temas hemos obtenido numerosos resultados, entre los cuales se destacan:

- La determinación de parámetros fundamentales y distancias de cientos de estrellas B normales y con líneas en emisión (B supergigantes, Be, B[e], Bn, Bp) empleando el sistema espectrofotométrico BCD.
- El modelado de los discos gaseosos que permitió determinar los tamaños y la estructura de los mismos, detectándose, en especial, anillos completos o fraccionados.
- El estudio de la emisión de ^{12}CO y SiO en estrellas B[e], confirmando la rotación Kepleriana, y el uso de las líneas de ^{13}CO para determinar el estado evolutivo de algunas estrellas.
- El estudio de las soluciones hidrodinámicas (vientos rápidos y vientos lentos), como alternativas para describir los vientos de las supergigantes B.
- La coexistencia de soluciones, que puede tener implicancias en la formación de un disco y su estabilidad.
- La variabilidad del viento y su vínculo con pulsaciones de modo extraño.

Agradecimientos: Agradezco a las autoridades de la Asociación Argentina de Astronomía y al jurado evaluador, conformado por los Dres. G. Dubner, Z. López García y D. García Lambas, por darme el honor de recibir el premio José Luis Sérsic. Quiero además agradecer, muy especialmente, a todos los integrantes y ex integrantes del grupo “Modelos de Estrellas Peculiares (MEP)” y a todos mis colaboradores extranjeros, por ayudar a unir esfuerzos para focalizarnos en el estudio de las estrellas Be y B[e]. Muchas gracias a todos ellos, por las largas discusiones y por los lindos momentos que juntos compartimos trabajando con mucho esmero para obtener estos interesantes resultados. Deseo también dar un merecido y especial agradecimiento a mi familia, Cecilia, Mercedes y Gustavo, a mis padres y hermano, por el amor que me brindan, y que brindaron, por su incondicional apoyo y por comprender mi loca pasión por la astronomía.

Referencias

- Aidelman Y., et al., 2012, A&A, 544, A64
 Aidelman Y., et al., 2015, A&A, 577, A45
 Aidelman Y., et al., 2018, A&A, 610, A30
 Araya I., et al., 2018, MNRAS, 477, 755
 Arias M.L., et al., 2006, A&A, 460, 821
 Barbier D., Chalonge D., 1941, Annales d’Astrophysique, 4, 30
 Bressan A., 1993, SSRv, 66, 373
 Castor J.I., Abbott D.C., Klein R.I., 1975, ApJ, 195, 157
 Chalonge D., Divan L., 1952, Annales d’Astrophysique, 15, 201
 Chalonge D., Divan L., 1973, A&A, 23, 69
 Cidale L., Zorec J., Tringaniello L., 2001, A&A, 368, 160
 Cidale L.S., 1998, ApJ, 502, 824
 Cidale L.S., 2018, BAAA, 60, 1
 Cidale L.S., Ringuelet A.E., 1989, PASP, 101, 417
 Cidale L.S., Ringuelet A.E., 1993, ApJ, 411, 874
 Cidale L.S., Vazquez A.C., 1995, ApJ, 453, 393
 Cidale L.S., et al., 2007, A&A, 468, 263
 Cidale L.S., et al., 2012, A&A, 548, A72

- Cochetti Y.R., et al., 2019, *A&A*, 621, A123
 Cochetti Y.R., et al., 2020, *A&A*, 634, A18
 Cranmer S.R., 2005, *ApJ*, 634, 585
 Curé M., 2004, *ApJ*, 614, 929
 Curé M., Cidale L., Granada A., 2011, *ApJ*, 737, 18
 Curé M., Rial D.F., Cidale L., 2005, *A&A*, 437, 929
 Delaa O., et al., 2011, *A&A*, 529, A87
 Divan L., 1979, M.F. McCarthy, A.G.D. Philip, G.V. Coyne (Eds.), *IAU Colloq. 47: Spectral Classification of the Future, Ricerche Astronomiche*, vol. 9, 247-256
 Ekström S., et al., 2012, *A&A*, 537, A146
 Frémat Y., et al., 2005, *A&A*, 440, 305
 Friend D.B., Abbott D.C., 1986, *ApJ*, 311, 701
 Granada A., Arias M.L., Cidale L.S., 2010, *AJ*, 139, 1983
 Haucke M., et al., 2018, *A&A*, 614, A91
 Jaschek M., Egret D., 1982, M. Jaschek, H.G. Groth (Eds.), *Be Stars, IAU Symposium*, vol. 98, 261
 Kastner J.H., et al., 2010, *AJ*, 139, 1993
 Kraus M., et al., 2014, *ApJL*, 780, L10
 Kraus M., et al., 2015a, *ApJL*, 800, L20
 Kraus M., et al., 2015b, *A&A*, 581, A75
 Kraus M., et al., 2016, *A&A*, 593, A112
 Lamers H.J.G.L.M., et al., 1998, *A&A*, 340, 117
 Lee C.D., Chen W.P., Liu S.Y., 2016, *A&A*, 592, A130
 Liermann A., et al., 2014, *MNRAS*, 443, 947
 Maravelias G., et al., 2018, *MNRAS*, 480, 320
 Mennickent R.E., et al., 2009, *PASP*, 121, 125
 Oksala M.E., et al., 2012, *MNRAS*, 426, L56
 Oksala M.E., et al., 2013, *A&A*, 558, A17
 Pauldrach A., Puls J., Kudritzki R.P., 1986, *A&A*, 164, 86
 Rivinius T., Carciofi A.C., Martayan C., 2013, *A&A Rv*, 21, 69
 Struve O., 1931, *ApJ*, 73, 94
 Torres A.F., et al., 2018, *A&A*, 612, A113
 Torres A.F., et al., 2012, *MNRAS*, 427, L80
 Vazquez A.C., Cidale L.S., Ringuelet A.E., 1993, *ApJ*, 419, 286
 Venero R.O.J., et al., 2016, *ApJ*, 822, 28
 Venero R.O.J., Cidale L.S., Ringuelet A.E., 2002, *ApJ*, 578, 450
 Zickgraf F.J., et al., 1985, *A&A*, 143, 421
 Zickgraf F.J., et al., 1986, *A&A*, 163, 119
 Zorec J., 1986, *Thèse d'État: Structure et rotation différentielle dans les étoiles B avec et sans émission*, Université Paris VII
 Zorec J., Briot D., 1991, *A&A*, 245, 150
 Zorec J., et al., 2007, *A&A*, 470, 239
 Zorec J., et al., 2009, *A&A*, 501, 297
 Zorec J., et al., 2016, *A&A*, 595, A132
 Zorec J., et al., 2017, *A&A*, 602, A83