

Fases de actividad y quietud en estrellas Be de cúmulos abiertos galácticos: una mirada con WISE

A. Granada^{1,2}, C.E. Jones², T.A.A. Sigut², T. Semaan³, C. Georgy³, G. Meynet³ & S. Ekström³

¹ Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

² Department of Physics and Astronomy, The University of Western Ontario, Canadá

³ Geneva Observatory, University of Geneva, Suiza

Contacto / granada@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / La fotometría de *WISE* (*Wide-Field Infrared Survey Explorer*) resulta muy útil para estudiar estrellas Be conocidas de cúmulos abiertos, y también para detectar nuevas candidatas a estrellas Be que pueden luego ser estudiadas espectroscópicamente. A través del modelado de fotometría infrarroja de sistemas estrella más disco con los códigos *Bedisk/Beray*, describimos adecuadamente las características fotométricas de estrellas Be en diecisiete cúmulos abiertos galácticos con edades entre 10 y 100 Myr. La ubicación de las estrellas Be en diagramas color-magnitud y color-color de *WISE*, permite separarlas en dos grupos: estrellas activas, aquellas que están rodeadas de un disco desarrollado, e inactivas o quietas, es decir en una etapa sin disco detectable. Esto nos permite estudiar la frecuencia con que las estrellas Be se encuentran en estos estados diferentes. Encontramos que alrededor de la mitad de las estrellas Be en los cúmulos estudiados está en una fase activa, y que esta fracción es dependiente del tipo espectral. La ubicación de las estrellas con un disco desarrollado en el diagrama color-magnitud requiere tasas de pérdida de masa que están de acuerdo con valores esperados para modelos estelares en rotación rápida.

Abstract / *WISE* (*Wide-Field Infrared Survey Explorer*) photometry is very useful for studying known Be stars from open clusters, and also detect new Be candidates that can then be studied spectroscopically. Through the modelling of near infrared photometry of star plus disc systems with *BEDISK/BERAY* codes, we adequately describe the photometric characteristics of Be stars in seventeen galactic open clusters with ages between 10 and 100 Myr. The location of the stars Be in *WISE* colour-magnitude and colour-colour diagrams, permits the classification in two groups: active stars (those that are surrounded by a developed disc) and quiescent objects (in a stage without a detectable disk). This allows us to study how often Be stars are in these different phases. We find that about half of the Be stars in the studied clusters are in an active phase, and that this fraction it is dependent on the spectral type. The location of the stars with a disc developed in the colour diagram magnitude requires mass loss rates that are in accordance with expected values for stellar models in rapid rotation.

Keywords / Stars: activity — Stars: emission-line, Be — (Galaxy:) open clusters and associations

1. Introducción

Las estrellas Be constituyen el grupo de estrellas de secuencia principal que giran más rápidamente, tanto en términos de velocidad angular de rotación (Ω/Ω_{crit}) como de su velocidad ecuatorial (V_{eq}). Las características observacionales que definen a estas estrellas de masa intermedia de secuencia principal incluyen la presencia de hidrógeno y líneas metálicas en emisión en sus espectros, un exceso de color infrarrojo, así como también variabilidad fotométrica y espectroscópica a corto y largo plazo. Estos observables, junto con las observaciones de radio, las firmas polarimétricas y los datos interferométricos, pueden ser explicados globalmente en el marco del modelo de disco de decreción viscoso (VDD por sus siglas en inglés). Para una revisión reciente sobre este tema, remitimos al lector a Rivinius et al. (2013).

Sin embargo, a pesar de todo el progreso en la comprensión de las estrellas Be y sus discos circunestelares, los mecanismos subyacentes que desencadenan la formación de una envoltura circunestelar de este tipo no se conocen aún.

Los cúmulos abiertos constituyen laboratorios ideales para estudiar las condiciones en las que se forman y evolucionan las estrellas Be, ya que podemos suponer que las estrellas de los cúmulos provienen de la misma nube primordial y comparten una ubicación espacial común, movimientos propios, composición química inicial y edad.

El sondeo del cielo realizado por el *Wide-Field Infrared Survey Explorer* (*WISE*) (Wright et al., 2010), que observó en cuatro bandas en $3.4\mu\text{m}$, $4.6\mu\text{m}$, $12\mu\text{m}$ y $22\mu\text{m}$ (bandas W1, W2, W3 y W4, respectivamente), ha permitido una mejor comprensión del cielo infrarrojo. La base de datos *AllWISE* (Cutri et al., 2013) proporciona observaciones con buena resolución angular que son adecuadas para estudiar la población de estrellas Be en cúmulos abiertos.

Para los filtros W1 y W2 los límites de saturación son $W1 = 8$ mag y $W2 = 7$ mag, respectivamente, y los límites inferiores de detección son $W1=14$ mag y $W2=13.5$ mag. Por lo tanto, es importante para nuestro trabajo seleccionar cúmulos en los que las estrellas

Tabla 1: Cúmulos abiertos galácticos con estrellas Be.

Name	Age (log(yr))	μ_0 (mag)	E(B-V) (mag)	Rcl (arcmin)
Berkeley86	7.15	11.091	0.958	7.8
King10	7.8	12.35	1.3	4.2
NGC457	7.3	11.901	0.4	7.8
NGC654	7.25	11.259	0.75	6.6
NGC2345	7.7	12.459	0.678	6.9
NGC2439	7.25	12.918	0.437	9.0
NGC3114	7.9	9.875	0.079	27.0
NGC3590	7.4	10.322	0.416	10.2
NGC6025	7.9	9.413	0.208	22.8
NGC6834	8	11.659	0.666	4.5
NGC6883	7.71	10.699	0.3	9.6
NGC7261	7.7	12.15	0.916	6.9

B de la secuencia principal tengan brillos por debajo del límite de saturación y por encima de la magnitud límite.

En el artículo de Granada et al. (2018), se usó la fotometría IR proporcionada por el catálogo AllWISE (Cutri et al., 2013) para estudiar las fases de actividad y quietud en estrellas Be de un grupo de cinco cúmulos abiertos con edades entre 10 y 30 Myr, que han sido ampliamente estudiados en la literatura (NGC 663, NGC 3766, NGC 4755, NGC 869 y NGC 884). Tales cúmulos no solamente son conocidos por ser particularmente abundantes en estrellas Be, sino que también las estrellas tipo B dentro de estos grupos tienen un brillo por debajo del límite de saturación y por encima de la magnitud límite, como se indicó en el párrafo anterior. En el presente trabajo, extendemos el trabajo de Granada et al. (2018) a otros doce cúmulos abiertos menos estudiados en la literatura, con edades entre 10 y 100 Myr.

Los nombres y parámetros de estos doce nuevos cúmulos dados por Kharchenko et al. (2013) (edad, módulo de distancia, exceso de color y radio del cúmulo), están tabulados en la Tabla 1. Estos autores estiman errores para E(B-V), edad, distancia y radio del cúmulo del 7%, 39%, 11% and 25%, respectivamente.

2. Análisis de los datos de AllWISE

Tal como fue realizado en Granada et al. (2018), para seleccionar los posibles miembros de los cúmulos en secuencia principal y de tipo espectral temprano, usamos el radio del cúmulo dado por Kharchenko et al. (2013) y la fotometría 2MASS (en bandas J , H y K) proporcionada junto con la fotometría WISE.

Convertimos la magnitud J observada y el color ($J - H$) a valores absolutos usando las distancias y excesos E($B - V$) brindadas por Kharchenko et al. (2013), y las relaciones empíricas para la extinción A_J y el exceso de E($J - H$) dados por Yuan et al. (2013). Estos coeficientes de extinción concuerdan con los valores promedio obtenidos independientemente por Davenport et al. (2014).

De todas las estrellas dentro del radio de cúmulo dado, seleccionamos objetos con $M_J \leq 1.5(J-H)_0 < 0.15$, que corresponden a las estrellas de secuencia principal de tipo espectral más temprano que A0, y a estrellas supergigantes azules (BSG). Al hacer esto, se eliminan objetos

que no pertenecen al cúmulo, las estrellas de presecuencia principal (véase, por ejemplo, Bonatto et al. (2006)), así como también las estrellas gigantes rojas y supergigantes rojas (RSG).

Para cada grupo, usamos las relaciones empíricas dadas por Yuan et al. (2013) para la extinción $A(W1)=0.19E(B - V)$ y el exceso de color $E(W1-W2)=0.036E(B - V)$, así como los excesos de color y el módulo de distancia (μ_0) dados por Kharchenko et al. (2013) para convertir la magnitud W1 observada y el color (W1-W2) en magnitudes y colores absolutos.

Según Kharchenko et al. (2013), los errores típicos E($B - V$) son del 7%, lo que se traduce en errores de 0,004 mag en la determinación de (W1-W2), mientras que los errores de observación típicos para este color son mayores que 0,02 mag. La incidencia en los errores de exceso de color en la determinación de W1 también es pequeña, particularmente si se tienen en cuenta los errores importantes en la distancia, que típicamente son del 11%.

En la Fig. 1 se presenta un diagrama color magnitud de WISE las estrellas de diecisiete cúmulos abiertos: los cinco cúmulos presentados en Granada et al. (2018) (NGC 663, NGC869, NGC 884, NGC 3766, NGC 4755) y doce nuevos cúmulos galácticos menos estudiados que también tienen estrellas Be, tabulados en Tabla 1. Los colores de los símbolos indican diferentes magnitudes absolutas en la banda J , que tomamos como representativos de diferentes tipos espectrales. Los colores verde y azul corresponden a estrellas Be tempranas (magnitud J entre -4 y -2), el color magenta a estrellas Be de tipo espectral intermedio (J entre -2 y -1 magnitudes) y los colores cian y amarillo a estrellas B tardías (con J entre 1 y -1). Las estrellas Be estudiadas por Granada et al. (2018) se indican con cuadrados negros, mientras que los círculos y triángulos corresponden a los nuevos cúmulos, con edades menores y mayores que 50 Myr, respectivamente.

Tal como fue hecho por Bonanos et al. (2010), definimos las estrellas Be fotométricas como estrellas de tipo B que tienen excesos de color dentro de un cierto rango. En el caso de los colores WISE, tal como se detalla en Granada et al. (2018), elegimos utilizar los criterios conservadores dados por Nikutta et al. (2014) según el cual la mayoría de las estrellas sin un disco polvoriento de secuencia principal o *normales* tienen $W1-W2 < 0.05$.

Podemos ver que las estrellas Be se agrupan principalmente en dos regiones, un grupo grande se encuentra junto con estrellas B normales en la región con $W1-W2$ entre -0.25 y 0.05 , y otro grupo en la región con $W1-W2$ entre 0.1 y 0.3 .

Con el fin de obtener el flujo continuo IR de estrellas de tipo espectral B1, B3 y B7 rodeadas de discos circunestelares, utilizamos los códigos BEDISK (Sigut & Jones, 2007) y BERAY (Sigut, 2011). El primero calcula la estructura de temperatura para una estructura de densidad de disco dada, mientras que el segundo resuelve el transporte radiativo a lo largo de 10^5 rayos a través del sistema estrella más disco para diferentes ángulos de inclinación. De esta forma, se pueden calcular diferentes observables, tales como como perfiles de línea, distribuciones de energía espectral o imágenes monocromáticas

proyectadas en el cielo.

Tal como se describió en Granada et al. (2018), utilizamos una distribución de densidad de disco axisimétrica en la que la densidad radial depende de dos parámetros: ρ_0 , la densidad en la base del disco, y n , el exponente de ley de potencia que determina cómo la densidad disminuye con la distancia en el plano ecuatorial de la estrella. Computamos distribuciones espectrales de energía con diferentes valores de ρ_0 (entre $10^{-12} \text{g cm}^{-3}$ y $10^{-10} \text{g cm}^{-3}$), y diferentes valores de n (entre 2 y 4). Estos son valores típicamente considerados en la literatura para estrellas Be (Rivinius et al., 2013). Encontramos que las combinaciones de estos parámetros que brindan los colores WISE que son observados, coinciden con los valores permitidos, tal como los definen Vieira et al. (2017). En el presente trabajo, las Be de los doce nuevos cúmulos estudiados caen en esta misma región del diagrama color-magnitud, adecuadamente descritas en el marco de los discos viscosos de decreción con tasas de pérdida de masa entre los valores dados por Vieira et al. (2017) y Granada et al. (2013). Hay un número de objetos sin clasificación Be con $W1-W2 > 0.5$ que son candidatas a Be y que merecerían ser estudiadas en el futuro.

3. Resultados

Para los diecisiete cúmulos estudiados hasta el momento entre el presente trabajo y Granada et al. (2018), casi 50 % de estrellas Be de tipo temprano y 60 % de estrellas Be de tipo espectral intermedio se encuentran en una fase activa. Interpretamos este resultado en términos del tiempo que pasa una estrella Be con un disco circunestelar desarrollado, que resulta aproximadamente la mitad del tiempo para estrellas Be tempranas o 60 % en Be intermedias.

Entre las estrellas activas, 14.3% de las Be tempranas y 9.1% de las estrellas Be intermedias de tienen un disco en fase de disipación o pequeño con $(W1-W2) < 0.15$. La mayor fracción observada en los tipos espectrales tempranos está de acuerdo con una mayor variabilidad observada en los tipos espectrales tempranos, relacionada con episodios de pérdida de masa variable en el disco (Rivinius et al., 2013).

El 32.7 % de estrellas Be tempranas y 51.5% de estrellas Be intermedias tienen un disco desarrollado, con $(W1-W2) \geq 0.15$.

Entre las estrellas tardías hay un gran número de candidatas a estrellas Be que deben ser confirmadas espectroscópicamente.

Agradecimientos: AG agradece a la Swiss National Science Foundation, Advanced Postdoc Mobility Grant number P300P2.158443. CEJ y TAAS agradecen el apoyo de Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada. Este trabajo es apoyado por el proyecto número 200020-172505 de la Swiss National Science Foundation. Esta publicación utiliza datos del Wide-field Infrared Survey Explorer, que es un proyecto conjunto de la Universidad de California, Los angeles y el Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, financiado por la National Aeronautics and Space Administration.

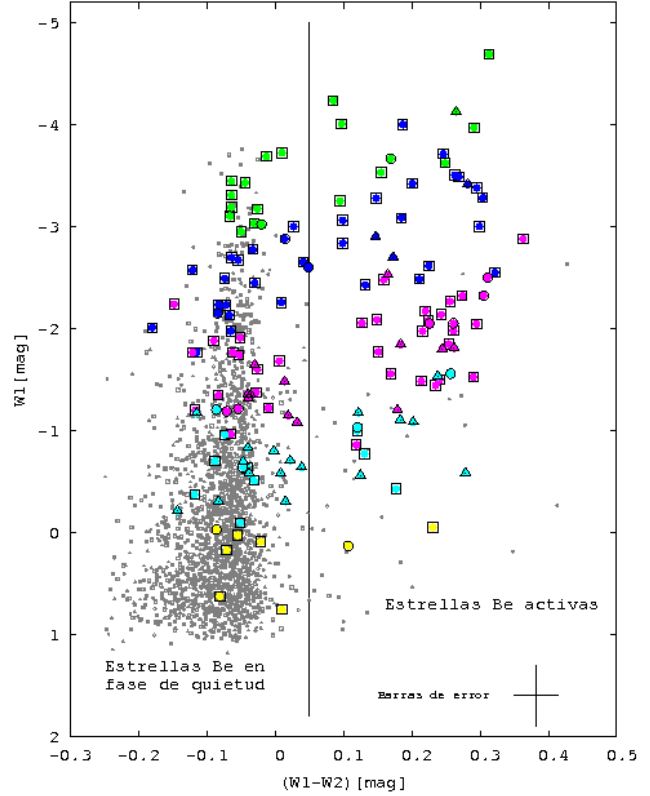


Figura 1: Diagrama color-magnitud de WISE para los diecisiete cúmulos abiertos galácticos. Los símbolos de colores indican estrellas Be, mientras que los diferentes colores corresponden a diferentes rangos de brillo en la banda J . Los cuadrados indican objetos de los cinco cúmulos estudiados en Granada et al. (2018), mientras que los triángulos y círculos corresponden a los doce nuevos cúmulos, con edades menores y mayores a 50 Myr, respectivamente.

Referencias

- Bonanos A. Z., et al., 2010, *AJ*, 140, 416
 Bonatto C., et al., 2006, *A&A*, 453, 121
 Cutri R. M., et al., 2013, *VizieR Online Data Catalog*, 2328, 0
 Davenport J. R. A., et al., 2014, *MNRAS*, 440, 3430
 Granada A., et al., 2013, *A&A*, 553, A25
 Granada A., et al., 2018, *AJ*, 155, 50
 Kharchenko N. V., et al., 2013, *VizieR Online Data Catalog*, 355, 80053
 Nikutta R., et al., 2014, *MNRAS*, 442, 3361
 Rivinius T., Carciofi A. C., Martayan C., 2013, *A&A Rev.*, 21, 69
 Sigut T. A. A., Jones C. E., 2007, *ApJ*, 668, 481
 Sigut T. A. A., 2011, in Neiner C., et al., eds., *IAU Symposium Vol. 272, IAU Symposium*, p. 426
 Vieira R. G., et al., 2017, *MNRAS*, 464, 3071
 Wright E. L., et al., 2010, *AJ*, 140, 1868
 Yuan H. B., Liu X. W., Xiang M. S., 2013, *MNRAS*, 430, 2188