# Relación actividad-rotación para estrellas frías

R.V. Ibañez Bustos<sup>1</sup>, A.P. Buccino<sup>1</sup> & P.J.D. Mauas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Astronomía y Física del Espacio, UBA-CONICET, Argentina

Contacto / ribanez@iafe.uba.ar

**Resumen** / La relación entre la rotación de una estrella y su actividad magnética es una clave fundamental para entender el dínamo estelar. Recientemente, han surgido nuevos debates en la teoría del dínamo sobre el rol de las capas estelares más internas. Un estudio más amplio sobre la actividad magnética a largo plazo de estrellas parcial y puramente convectivas nos permitiría comprender si su dínamo subyacente puede mantener ciclos de actividad similares al solar. En este trabajo, caracterizamos la actividad magnética de un conjunto estrellas M enanas activas e inactivas. Analizamos los datos fotométricos de las curvas de luz de *TESS* para clasificar los eventos transitorios y medir su rotación y también, analizamos su actividad magnética a partir del indicador  $log(R'_{HK})$  derivados de los espectros de CASLEO.

**Abstract** / The relationship between stellar rotation and magnetic activity is key to understand stellar dynamos. Recently, new debates on the role of the innermost layers of the star, have emerged within the stellar dynamo theory. A more extensive study of the long-term magnetic activity of partially and fully convective stars would allow us to understand whether their underlying dynamo is responsible for solar-like activity cycles. In this work, we study the magnetic activity of active and inactive M dwarfs. We analyze *TESS* light curves to characterize transient events and determine its rotation. We also study their magnetic activity using the  $log(R'_{HK})$  indicator derived from the CASLEO spectra.

Keywords / stars: activity — stars: late-type — techniques: spectroscopic

#### 1. Introducción

El dínamo solar (dínamo  $\alpha\Omega$ ), es el proceso físico por el cual se generan y amplifican los campos magnéticos en el Sol, responsables de la actividad solar. El dínamo  $\alpha\Omega$ modela la retroalimentación entre el campo magnético poloidal y toroidal por efecto de la rotación diferencial, los movimiento helicoidales en la zona convectiva y la circulación meridional del plasma (Parker, 1955; Charbonneau, 2020).

Cientos de estrellas frías de secuencia principal (F5V a M1V) presentan ciclos de actividad similares al ciclo solar de 11 años (Baliunas et al., 1995). En estrellas más frías donde la convección se vuelve dominante, se han reportado niveles de actividad más altos que en el caso del Sol y de las estrellas más tempranas (Cincunegui et al. 2007; Díaz et al. 2007; Buccino et al. 2014; Ibañez Bustos et al. 2019b).

El indicador de actividad estelar típico utilizado es el índice S de Mount Wilson, que se define como el cociente entre los flujos integrados en las bandas de paso triangulares de las líneas H&K del Ca II y su continuo cercano (Vaughan et al., 1978). Otro indicador de actividad es el índice  $R'_{HK}$  que se define como la relación entre la emisión cromosférica de las líneas del Ca II sin contribución fotosférica y la emisión bolométrica total de la estrella (Noyes et al., 1984). El índice  $R'_{HK}$  permite comparar los niveles de actividad de estrellas de diferentes tipos espectrales.

En los últimos años, ha surgido un nuevo interés en las enanas M debido a la abundancia de las mismas en la vecindad solar y a que muchas de ellas representan un importante laboratorio para la búsqueda de exoplanetas, debido a la alta tasa de ocurrencia de planetas extrasolares orbitando en su zona de habitabilidad (Bonfils et al. 2013; Dressing & Charbonneau 2015). Sin embargo, la habitabilidad en estos planetas puede verse afectada por los altos niveles de radiación ultravioleta relacionados con la actividad estelar (e.j.Buccino et al. 2007). Por otro lado, las enanas M son estrellas muy activas cuyos niveles de actividad pueden impedir la detección de los planetas que las orbitan. Actualmente se conoce que la actividad de algunas estrellas M está determinada por su rotación. Las rotadoras más rápidas ( $P_{rot} < 10$ d) alcanzan el nivel máximo de actividad. Mientras que las rotadoras lentas, disminuyen su actividad al aumentar el  $P_{rot}$  (Astudillo-Defru et al., 2017). Sin embargo, algunas estrellas puramente convectivas no acompañan este patrón (Ibañez Bustos et al., 2020b).

## 2. Observaciones

Desde 1999, el Proyecto HK $\alpha$  opera en el Observatorio Argentino CASLEO (Complejo Astronómico El Leoncito). Este programa, creado y operado por el grupo de Física Estelar, ExoPlanetas y Astrobiología (FEEPA) del IAFE, observa sistemáticamente más de 150 estrellas de la secuencia principal donde el tipo espectral va desde F3 a M5.5. A la fecha, contamos con más de 6000 espectros de resolución media con un rango en longitud de onda de 389 a 669 nm, que permite estudiar los comportamientos fotosféricos y cromosféricos de la atmósfera estelar. Con el objetivo de estudiar la relación entre la rotación estelar y la actividad magnética, también utilizamos los datos fotométricos de alta cadencia temporal del TRANSITING EXOPLANET SURVEY SATELLITE (TESS). El satélite TESS observa alrededor de 200.000 estrellas preseleccionadas para las que se registra fotometría de apertura fija cada dos minutos durante al menos 27 días.

En este trabajo, presentamos un estudio de un conjunto de 6 enanas M activas e inactivas del Proyecto HK $\alpha$ . En primer lugar, estudiamos los eventos transitorios asociados con fulguraciones, utilizando las curvas de luz fotométricas de TESS. Luego, analizamos la relación actividad-rotación empleando sus índices  $R'_{HK}$  (reportados en Ibañez Bustos et al. 2020a) y sus períodos de rotación hallados en la literatura y en el presente trabajo.

### 3. Resultados

Las enanas M conforman el ~ 70 % de las estrellas de nuestra galaxia y generalmente se las divide en estrellas inactivas "dM", cuyos espectros presentan la línea H $\alpha$  a 656.2 nm en absorción, y estrellas activas "dMe", con H $\alpha$  en emisión.

Numerosos estudios indican que los niveles de actividad de las estrellas dM son altos y que sus tasas de fulguraciones son elevadas (Hawley et al. 2014; Vida et al. 2019). Estos eventos transitorios pueden afectar a la caracterización de las estrellas M, dado que el nivel en el flujo estelar presenta un gran incremento en diferentes rangos espectrales. Para lograr una correcta medición del período de rotación y detección de los ciclos de actividad estelar, es necesario eliminar aquellos datos asociados a eventos de las curvas de luz fotométricas y de las series temporales espectroscópicas.

En este trabajo realizamos un estudio para conocer la relación actividad-rotación para 6 de las estrellas previamente estudiadas en Ibañez Bustos et al. (2020a), listadas en Tabla 1.

En primer lugar, analizamos las curvas de luz de TESS para caracterizar sus eventos transitorios (por ejemplo, fulguraciones) y poder obtener su modulación rotacional. Para ello, estudiamos las series temporales con el algoritmo de FLARE DETECTION WITH RANSAC METHOD (FLATW'RM) basado en técnicas de aprendizaje de maquinas (Vida & Roettenbacher, 2018).

Con la salida del FLATW'RM detectamos las fulguraciones en la curva de luz (ver Fig. 1 arriba) y el tiempo de su duración equivalente ( $\varepsilon_f$ ) que lo multiplicamos por la luminosidad estelar quiescente ( $L_*$ ), para obtener la energía en la banda de paso de TESS ( $E_f$ ). Estimamos la luminosidad quiescente realizando la convolución entre la función respuesta de TESS y el espectro de cuerpo negro para cada estrella.

Siguiendo el análisis de Gizis et al. (2017), estudiamos la distribución de frecuencia de fulguración,  $\nu_f$ (número de fulguraciones con una energía dada dividido por el tiempo total de observación). La relación  $E_{f}$ - $\nu_{f}$ está dada por la ecuación:

$$\log \nu_f = a + \beta \log E_f$$



Figura 1: Ejemplo de la detección automática de las fulguraciones mediante el algoritmo FLATW'RM. *Panel superior:* Curva de luz de TESS para una estrella de la muestra. En rojo mostramos las fulguraciones detectadas por el programa. *Panel inferior:* Curva de luz sin fulguraciones. Analizamos la modulación rotacional con el periodograma GLS y en rojo graficamos el mejor ajuste a la curva.

donde la pendiente  $\beta = (1 - \alpha)$  se encuentra ajustando la distribución mediante una función lineal, y  $\alpha$  es un indicador que expresa cómo se disipa la energía de la fulguración de la estrella. En la Fig. 2 mostramos el mejor ajuste lineal para el rango de energía de cada estrella.

Para analizar la modulación rotacional, descartamos los puntos asociados a fulguración detectados por FLATW'RM y estudiamos las curvas de luz resultantes (Fig.1, abajo), utilizando el periodograma *Generalized Lomb-Scargle* (GLS; Zechmeister & Kürster 2009). Todos los resultados se reportan en la Tabla 1.

Por otra parte, las líneas del Ca II son buenos indicadores de la emisión cromosférica y fotosférica tanto en estrellas activas como inactivas. Para estudiar y comparar el nivel de actividad cromosférica para diferentes estrellas M en Ibañez Bustos et al. (2020a) obtuvimos el índice  $R'_{HK}$  utilizando la base de datos de CASLEO. Dado que existe una estrecha relación entre la rotación y el nivel de actividad de la estrella (Noyes et al., 1984; Wright & Drake, 2016), en la Fig. 3 mostramos nuestras mediciones en un diagrama  $logR'_{HK} - P_{rot}$ , donde incluimos el ajuste de Astudillo-Defru et al. (2017) para un conjunto diferente de estrellas M.

### 4. Discusión

En este trabajo presentamos un estudio preliminar sobre los parámetros de la actividad de 6 estrellas M a partir observaciones propias de CASLEO y públicas del satélite TESS. Se detectaron fulguraciones en 5 de las estrellas de nuestra muestra, permiténdonos concluir que estrellas activas e inactivas pueden presentar una alta tasa de fulguraciones.

La estrella más tardía de la muestra presenta la frecuencia de fulguración más baja, así como los niveles de energía liberados en cada evento son los más bajos encontrados. Determinamos para esta estrella dM3 un

#### Ibañez et al.

Tabla 1: Parámetros estelares, log  $R'_{HK}$  (col. 5), período de rotación (col.6), frecuencia de fulguraciones en la curva de luz (col. 9) y energía liberada por las fulguraciones (col.10) para las 6 estrellas de nuestra muestra.

TEspec.	$\begin{array}{c} M^{(a)} \\ (M_{\odot}) \end{array}$	$\begin{array}{c}T_{ef}{}^{(a)}\\(\mathrm{K})\end{array}$	(B-V)	$\log {R'_{HK}}^{(b)}$	$\frac{P_{rot}{}^{(c)}}{(días)}$	FAP	$L_*^{(d)}$ (erg/s)	$ u^{(d)} $ $(1/día)$	$\frac{E_f{}^{(d)}}{(\text{erg})}$
dM0e	_	_	1.443	-4.006	2.624**	< 0.1 %	_	1.97	_
dM1e	0.61	3918	1.428	-4.028	$6.562^{**}$	< 0.1%	$8.6 imes10^{31}$	0.91	$3 imes 10^{32} - 1 imes 10^{34}$
dM1e	0.54	3742	1.423	-3.826	4.85		$5.5 imes10^{31}$	1.56	$3 imes 10^{32} - 4 imes 10^{36}$
dM1.5	0.52	3701	1.475	-4.608	35.0		$4.8  imes 10^{31}$	1.75	$4  imes 10^{31} - 2  imes 10^{34}$
dM2	0.46	3589	1.460	-5.682	60.1		$3.3 imes10^{31}$	0.00	—
dM3	0.39	3491	1.535	-4.761	$3.592^{**}$	< 0.1%	$2.1 imes10^{31}$	0.52	$3 imes 10^{31} - 5 imes 10^{32}$

(a) Gaidos et al. (2014) <sup>(b)</sup> obtenidos en Ibañez Bustos et al. (2020a) <sup>(c)</sup> Períodos de rotación reportados en la literatura a excepción de los señalados con '\*\*'que fueron obtenidos en este trabajo. <sup>(d)</sup> obtenidos en este trabajo.



Figura 2: Ocurrencia de fulguraciones por día en función de la energía liberada por las mismas detectadas de manera automática mediante el algoritmo FLATW'RM.



Figura 3: Diagrama log  $R'_{HK} - P_{rot}$  que incluye el ajuste (líneas grises) de Astudillo-Defru et al.. Mostramos las estrellas M cuyos valores de log  $R'_{HK}$  fueron reportados en Ibañez Bustos et al. (2019a) utilizando espectros CASLEO.

período de rotación de 3.59 días que la posiciona en el régimen de saturación de la Fig. 3. Sin embargo, su bajo nivel de actividad (log  $R'_{HK}$ =-4.71) la aleja en más de  $3\sigma$  del ajuste obtenido por Astudillo-Defru et al. (2017)

(líneas grises de la Fig. 3) para otro conjunto de estrellas dM tempranas. Este punto aislado indicaría que en las estrellas rotadoras rápidas de baja masa puede operar un mecanismo físico diferente al del dínamo solar que opera en las estrellas M más masivas.

De los resultados volcados en la Tabla 1, podemos ver que en estrellas dMe los niveles de energía de las fulguraciones difieren en hasta cinco órdenes de magnitud del encontrado para su estado tranquilo. Estas estrellas activas son rotadoras rápidas ( $P_{rot} < 10$  días) y muestran niveles de energía en su estado quiescente mayores que los hallados para las estrellas inactivas de la muestra. El estudio preliminar aquí presentado pretende mostrar una metodología de análisis para una pequeña muestra que se extenderá a decenas de estrellas M con diferentes parámetros estelares, la cual se complementará con una análisis de la actividad magnética a largo plazo.

#### Referencias

- Astudillo-Defru N., et al., 2017, A&A, 600, A13
- Baliunas S.L., et al., 1995, ApJ, 438, 269
- Bonfils X., et al., 2013, A&A, 549, A109
- Buccino A.P., Lemarchand G.A., Mauas P.J.D., 2007, Icarus, 192, 582
- Buccino A.P., et al., 2014, ApJL, 781, L9
- Charbonneau P., 2020, Living Rev. Sol. Phys., 17, 4
- Cincunegui C., Díaz R.F., Mauas P.J.D., 2007, A&A, 461, 1107
- Díaz R.F., et al., 2007, A&A, 474, 345
- Dressing C.D., Charbonneau D., 2015, ApJ, 807, 45
- Gaidos E., et al., 2014, MNRAS, 443, 2561
- Gizis J.E., et al., 2017, ApJ, 845, 33
- Hawley S.L., et al., 2014, ApJ, 797, 121
- Ibañez Bustos R.V., Buccino A.P., Mauas P.J.D., 2020a, BAAA, 61B, 75
- Ibañez Bustos R.V., et al., 2019a, MNRAS, 483, 1159
- Ibañez Bustos R.V., et al., 2019b, A&A, 628, L1
- Ibañez Bustos R.V., et al., 2020b, A&A, 644, A2
- Noyes R.W., et al., 1984, ApJ, 279, 763
- Parker E.N., 1955, ApJ, 122, 293
- Vaughan A.H., Preston G.W., Wilson O.C., 1978, PASP, 90, 267
- Vida K., Roettenbacher R.M., 2018, A&A, 616, A163
- Vida K., et al., 2019, ApJ, 884, 160
- Wright N.J., Drake J.J., 2016, Nature, 535, 526
- Zechmeister M., Kürster M., 2009, A&A, 496, 577