



Plan de Investigación

Primer Plan de Investigación presentado

Título de la Tesis Doctoral

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

Antecedentes.

La abundancia de Li observada en la fotosfera de las estrellas es un indicador de su composición interior y de los procesos de mezclado que en ella tienen lugar. Adicionalmente, estas abundancias (además de otras métricas) se utilizan para comprobar la validez de los modelos estelares. Para que esto sea posible hay que tomar como premisa inicial que la abundancia de Li generada en la nucleosíntesis asociada al Big Bang es conocida y que este elemento solo se destruye a través de reacciones nucleares. A pesar de décadas de esfuerzos teóricos, se sigue sin encontrar una explicación coherente a partir de los modelos para las discrepancias encontradas en las comparaciones entre la abundancia de Li para estrellas pertenecientes a cúmulos de diferentes edades y que además se encuentran en el mismo estado evolutivo, o bien en la PMS, o bien en MS. Adicionalmente, estos modelos teóricos no son capaces de explicar las abundancias detectadas en las etapas tardías de la MS (Tschäpe & Rüdige, 2001).

En la elaboración de estas predicciones han sido principalmente utilizados los denominados modelos estándar (Sestito & Randich, 2005); entendiendo por estándar a aquellos modelos que incluyen sólo los mecanismos de convección como proceso de mezcla y no tienen en cuenta fenómenos que podrían influir también en la destrucción del Li, como pueden ser los efectos provocados por la rotación estelar, la pérdida de momento angular o la presencia de planetas.

De manera similar estos modelos estándar tampoco son capaces de proporcionar resultados consistentes con las observaciones realizadas sobre estrellas de tipo M. Acorde al conocimiento que se tiene sobre este tipo de estrellas, se puede realizar una primera clasificación entre aquellas que son totalmente convectivas y las que desarrollan un núcleo radiativo y una zona convectiva por encima de éste. El límite teórico para la transición entre ambas poblaciones se sitúa entorno a $0.3 M_{\odot}$, correspondiente al tipo espectral M4 (Stassun et al., 2010). Por debajo este umbral la zona convectiva se extendería hasta alcanzar el núcleo de la estrella.

Las estructuras estelares correspondientes a los tipos espectrales anteriores y posteriores a M4 se presuponen bastante dispares las unas de las otras y debido a este hecho, se esperan observar diferentes fenómenos que deberían de estar conectados, de manera directa o indirecta, con la transición del mencionado umbral de masa. Entre los mecanismos impactados deberían de encontrarse los que gobiernan el período de rotación de la estrella, la intensidad y configuración del campo magnético, así como las escalas temporales evolutivas asociadas a ellos.



Hipótesis y justificación.

Desde los años veinte del siglo pasado está aceptado el hecho de que la rotación es capaz de inducir al mezclado de los elementos presentes en el interior de las estrellas. Ya los estudios de Eddington (1925) y Vogt (1925) revelaron el hecho de que la circulación meridional debe surgir necesariamente en aquellas estrellas en rotación como consecuencia de la paradoja de von Zeipel: una estrella no puede estar simultáneamente en equilibrio térmico e hidrostático si la velocidad de rotación de ésta depende exclusivamente de su radio. La solución a esta pasa por la existencia de circulaciones meridionales. A su vez, este tipo de inestabilidad implica un impacto en los mecanismos de convección no considerados por los modelos estándar. Adicionalmente a este tipo de inestabilidad, existen a día de hoy un catálogo de otras que aparecen como consecuencia de asumir modelos en rotación (Maeder & Meynet, 2003), especialmente la rotación diferencial en función del radio de la estrella o la desviación de la simetría esférica. Aunque inicialmente estos efectos podrían ser candidatos a explicar las observaciones, lo cierto es que en el Sol la desviación de la simetría esférica medida es del orden de 10^{-5} y la escala de tiempo para la circulación meridional es del orden de 10^{12} años, un período temporal muy por encima de la escala de tiempo de combustión nuclear (Pinsonneault, 1997). De esto podemos concluir que los datos observacionales demandan un replanteamiento de los mecanismos de mezclado no presentes en los modelos estelares estándar que puedan dar respuesta a estas medidas.

Siguiendo el planteamiento propuesto por Pinsonneault (1997) el problema de la evolución estelar con la rotación puede dividirse en una serie de premisas que deben incluirse en los modelos teóricos. El mejor enfoque general sigue siendo el propuesto por Endal & Sofia (1978), en el que argumentan que para analizar los efectos de mezclado debido al efecto de la rotación hay primeramente que entender cuáles son los mecanismos que gobiernan la evolución del momento angular dentro de la estrella y posteriormente el grado de influencia de estos en el mezclado químico de los elementos como consecuencia de la distribución de ese momento angular a otras zonas de la estrella. Adicionalmente, para reproducir esta variación del momento angular en función del tiempo, es necesario establecer qué otros mecanismos pueden influir en la misma y en su transporte interno resto de la estrella para, de este modo, conseguir que el modelo siga siendo consistente.

Entre los posibles mecanismos documentados, las ondas gravitacionales internas han recibido recientemente atención en dos vertientes, por un lado como medio para el transporte interno de momento angular (Barkat & Ogilvie, 2010), y por otro como vía intensificadora del proceso de mezclado químico en las capas superficiales de las estrellas de baja masa (Rogers & McElwaine, 2017). En un planteamiento similar, los campos magnéticos generados por las estrellas pueden ser notablemente eficientes en el transporte interno del momento angular (Ud-Doula et al., 2007). El frenado causado por estos campos magnéticos causan una redistribución interna del momento angular que afecta a la rotación de la propia estrella y por tanto, de forma general, a los mecanismos de mezclado que ocurren en el interior estelar y de forma particular al de destrucción de Li.

En lo que se refiere a las estrellas de tipo M, esperamos comprobar si la bimodalidad encontrada en los periodos de rotación de las mismas (McQuillan et al., 2013) puede explicarse gracias a la aparición de un núcleo radiativo y, por tanto, de un campo



magnético que genere un frenado, al producirse una transición de tipos más tempranos a M4 a tipos más tardíos (Stassun et al., 2010). De forma paralela, los resultados derivados de las simulaciones a realizar ayudarán a entender mejor cómo la estructura de una estrella de tipo M, con una determinada masa inicial y composición química, se comporta ante la presencia de un campo magnético durante su evolución.

Objetivos.

En el presente plan de investigación nos vamos a enfocar en estudiar la influencia de estos procesos alternativos, en particular los causados por la rotación estelar y frenado magnético, en el proceso de destrucción del Li en estrellas de tipo solar, en las velocidades de rotación en estrellas de tipo M.

Los objetivos principales del presente plan de investigación serán los siguientes:

- Estudio de los efectos de la rotación en la destrucción del Li
- Estudio de la pérdida de momento angular debido a la pérdida de masa y frenado magnético.
- Modelar y simular los mecanismos de rotación y variación de momento angular debido a los efectos de pérdida de masa y frenado magnético
- Estudio de la posible relación causa-efecto entre el campo magnético y la bimodalidad en los períodos de rotación de las estrellas tipo M.
- Analizar comparativamente los resultados de las simulaciones con datos disponibles en los catálogos AMBRE y CARMENES.

Metodología.

En este plan de investigación nos apoyaremos en la herramienta de evolución estelar Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA). Este simulador incorpora módulos que se actualizan de manera periódica en base a los avances derivados de los trabajos más novedosos sobre ecuaciones de estado, opacidad, velocidades de reacción nuclear, datos de difusión de elementos y condiciones de límite atmosférico.

Es una herramienta muy útil para poder contrastar mediciones obtenidas con los resultados arrojados por un determinado modelo, o para hacer predicciones a partir de modelos y contrastar los resultados que obtenemos de estos con las mediciones disponibles en otros trabajos de investigación.

En la presente línea de investigación estamos interesados en poder detectar la posible relación directa existente en estrellas de tipo solar ante la presencia un campo magnético de determinada intensidad, la pérdida de momento angular que este provoca y las concentraciones de Li medidas en sus atmósferas estelares. En particular, se tratará de reproducir y determinar, en una primera aproximación, cómo y en qué grado este mecanismo influye en los procesos físicos que tienen lugar en el interior estelar. Así mismo, ya que la quema del Li se realiza a temperaturas relativamente bajas hemos restringiremos el estudio a las fases estelares evolutivas comprendidas desde la PMS hasta la TAMS.

A día de hoy el simulador MESA no incluye rutinas de simulación para el efecto causado por el frenado magnético. En estas circunstancias, nos encontramos con la



necesidad de desarrollar, en primera instancia, un modelo teórico de cómo reflejar la influencia del frenado magnético sobre el momento angular de la estrella. Posteriormente deberá ser codificado e incorporado al comportamiento simulador, al mismo tiempo que se respeta su estructura modular y sobre todo, sin provocar efectos indeseables en el resto de parámetros de la simulación.

Una vez los efectos del frenado magnético hayan sido integrados de manera satisfactoria en el comportamiento del simulador, se procederá a realizar un conjunto de simulaciones a partir de un modelo calibrado acorde a los parámetros solares. Dichas simulaciones estarán encaminadas a reflejar los valores de intensidad del campo magnético, concentración de Li en superficie y velocidad de rotación actualmente detectables en el Sol.

Para el estudio de las estrellas de tipo M, las simulaciones irán encaminadas a observar los efectos del campo magnético sobre estrellas de este tipo con diferentes masas y metalicidades iniciales respecto de la velocidades de rotación de las mismas.

Los resultados obtenidos de los dos grupos de simulaciones se contrastarán con los datos recogidos en los catálogos AMBRE (Activation Mechanism of Bora-Plk1 Regulating Entry) en relación a las abundancias de Li y CARMENES (Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exo-earths with Near-infrared and optical Echelle Spectrographs) para el estudio de las estrellas tipo M.

Planificación temporal.

Actividades	I año		II año		III año		IV año	
	1S	2S	1S	2S	1S	2S	1S	2S
Estudio Li en estrellas tipo solar								
Estudio bimodalidad en estrellas tipo M								
Desarrollo rutina frenado magnético								
Generación malla para estrellas tipo solar								
Comparación con datos Li (AMBRE)								
Generación malla para estrellas tipo M								
Comparación con datos CARMENES								
Consolidación de resultados								
Redacción tesis								



Referencias bibliográficas.

- [1] Tschäpe, R. & Rüdige, G., 2001. Rotation-induced lithium depletion of solar-type stars in open stellar clusters. A&A, Volumen 377, pp. 84-89.
- [2] Sestito, P. & Randich, S., 2005. Time scales of Li evolution: a homogeneous analysis of open clusters from ZAMS to late-MS. A&A, 442(2).
- [3] Stassun, K.G. et al., 2010. The M4 Transition: Toward a comprehensive understanding of the transition into the fully convective regime. Stellar Systems, and the Sun. ASP Conference Series, Vol. 448.
- [4] Maeder, A. & Meynet, G., 2003. Stellar evolution with rotation and magnetic fields: I. The relative importance of rotational and magnetic effects. A&A Volume 411, Number 3, pp. 543 - 552
- [5] Pinsonneault, M., 1997. Mixing in Stars. Annual Review of A&A 1997 35:1, 557-605.
- [6] Endal, A.S. & Sofia, S., 1978. The evolution of rotating stars. II - Calculations with time-dependent redistribution of angular momentum for 7- and 10-solar-mass stars. Astrophysical Journal, Part 1, vol. 220, Feb. 15, 1978, p. 279-290.
- [7] Barker J. & Ogilvie, G., 2010. Internal wave breaking and the fate of planets around solar-type stars. International Astronomical Union, 6(S271), 363-364.
- [8] Rogers, T.M. & McElwaine, J.N., 2017. On the chemical mixing induced by internal gravity waves. The Astrophysical Journal Letters, Volume 848, Number 1.
- [9] Ud-Doula, A. & Owocki S.P., 2002. Dynamical Simulations of Magnetically Channeled Line-driven Stellar Winds. I. Isothermal, Nonrotating, Radially Driven Flow. The Astrophysical Journal, Volume 576, Number 1.
- [10] McQuillan A. et al., 2013. Measuring the rotation period distribution of field M dwarfs with Kepler, MNRAS, Volume 432, Issue 2, 21 June 2013, Pages 1203–1216

Codirección

Director: Dr. Juan Carlos Suárez Yanes (jcsuarez@iaa.es)

Director: Dr. Antonio García Hernández (agh@ugr.es)