



Dependencia entre la mezcla en los bordes de regiones convectivas y la masa estelar

F.D. Moyano¹, J.A. Panei^{1,2} & J.A. Moreno¹

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

² Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

Contacto / fmoyano@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / La mezcla convectiva en los interiores estelares es uno de los procesos menos entendidos, aunque es de fundamental importancia para construir modelos teóricos. El *overshooting* (OV) es un proceso que provoca que la mezcla se extienda más allá de los bordes de las regiones convectivas, usualmente impuestos por el criterio de Schwarzschild. En la aproximación difusiva, se usa un parámetro libre (f_{ov}) que mide su eficiencia. El valor de f_{ov} adoptado en los modelos puede afectar propiedades importantes, como la edad inferida de cúmulos estelares. En este trabajo estudiamos cómo varía la eficiencia del OV con la masa estelar, incluyendo procesos adicionales de mezcla, como la semi-convección y mezcla termohalina. Para ello, computamos modelos de evolución estelar y los ajustamos a datos observacionales de estrellas con medidas precisas de parámetros fundamentales, para inferir valores de f_{ov} . Encontramos que la eficiencia del OV aumenta con la masa estelar hasta $\sim 2.5 M_{\odot}$ y luego se mantiene aproximadamente constante.

Abstract / Convective mixing in stellar interiors is one of the most misunderstood processes, although it is fundamental to build theoretical models. Convective overshooting (OV) is a process that extends the mixing beyond the convective boundaries imposed by the classical Schwarzschild criterion. In the diffusive approximation, this process depends on a free parameter (f_{ov}) which measures its efficiency. The value of f_{ov} adopted in models can affect important parameters, such as the inferred age of stellar clusters. In this work we study the relationship between OV strength and stellar mass. We take into account additional mixing processes, such as semi-convection and thermohaline mixing. We use our stellar evolution code to compute models and compare them to measured and accurate properties of stars in order to infer values of f_{ov} . We find that OV strength increases with stellar mass up to $\sim 2.5 M_{\odot}$ and then remains approximately constant.

Keywords / stars: evolution — stars: interiors — convection — binaries: eclipsing

1. Introducción

La mezcla convectiva en los interiores estelares es uno de los procesos más inciertos y menos entendidos, aunque es de fundamental importancia para construir modelos teóricos que logren explicar la estructura y evolución de las estrellas. El *overshooting* (OV) es un proceso en el cual los elementos convectivos, debido a su inercia, sobrepasan los bordes de las regiones convectivas impuestos por el criterio de Schwarzschild. En la aproximación difusiva (Herwig et al., 1997), la eficiencia del OV se ajusta mediante un parámetro libre, usualmente denominado f_{ov} . En estrellas de secuencia principal con núcleos convectivos, esto puede provocar que más hidrógeno llegue a las zonas de quema de hidrógeno, alargando el tiempo de vida en esta etapa. En los modelos de evolución estelar, esto puede afectar a las secuencias evolutivas, y como consecuencia, la forma de las isócronas que se construyen a partir de ellas (ver, por ejemplo, Pietrinferni et al., 2004). Esto afecta a la edad inferida de cúmulos abiertos de edad intermedia ($\sim 1 - 5$ Gyr).

La eficiencia del OV con las propiedades físicas, como ser, la masa o la composición química de estrellas es aún incierta. Por lo que una calibración de la eficien-

cia del OV puede mejorar el acuerdo entre la teoría y las observaciones. Varios esfuerzos han sido realizados para estudiar la eficiencia del OV, por ejemplo, usando el ancho de la secuencia principal de cúmulos estelares (Schaller et al., 1992), medidas precisas de sistemas binarios eclipsantes (Claret & Torres, 2018, 2019), o argumentos teóricos (Roxburgh, 1965, 1978), entre otros. Las estrellas binarias son excelentes escenarios para calibrar este parámetro, ya que en ellas se posee una restricción adicional sobre los modelos; la edad de ambas estrellas del sistema debe ser aproximadamente la misma.

En trabajos recientes, empleando la teoría de mezcla *mixing-length* (MLT), se ha estudiado la dependencia del valor de f_{ov} con la masa estelar. En la teoría convectiva MLT se asume una composición química homogénea, aunque en el interior estelar esta cambia debido a, entre otros procesos, reacciones nucleares. En este trabajo estudiamos este problema incorporando procesos adicionales de mezcla que tienen en cuenta gradientes de composición química, en particular, estudiamos el efecto de la mezcla termohalina y la semi-convección. La mezcla termohalina es un proceso convectivo local que ocurre cuando hay gradientes de composición química invertidos (e.g. Ulrich, 1972), mientras que la semi-convección es una inestabilidad vibracional de los ele-

mentos convectivos, estabilizados por gradientes de composición química (e.g. Kato, 1966). Estos efectos son más importantes en estrellas fuera de la secuencia principal, donde además, los efectos del OV son más apreciables.

2. Métodos y Datos

Un requisito importante para llevar a cabo este estudio es contar con una muestra de datos de estrellas con medidas precisas y exactas de masas absolutas, radios, temperaturas efectivas y abundancias químicas. Esto impone restricciones precisas sobre los modelos. También es importante que las estrellas estén lo suficientemente evolucionadas, para que los efectos del OV sean apreciables. Esto es posible si las estrellas están sobre el final de la secuencia principal o en la etapa de gigantes. Los datos analizados corresponden a sistemas binarios eclipsantes y separados, en donde las líneas espectrales de ambas estrellas son visibles. La muestra de estrellas binarias analizada es aquella recopilada por Claret & Torres (2019), que contiene 50 sistemas binarios con medidas precisas de masa (M), radio (R), temperatura efectiva (T_{ef}) y en algunos casos la metalicidad ($[\text{Fe}/\text{H}]$), de ambas componentes. En la Fig. 1 mostramos los datos de los sistemas analizados, en el plano M vs. R , que dan cuenta del estado evolutivo de las estrellas.

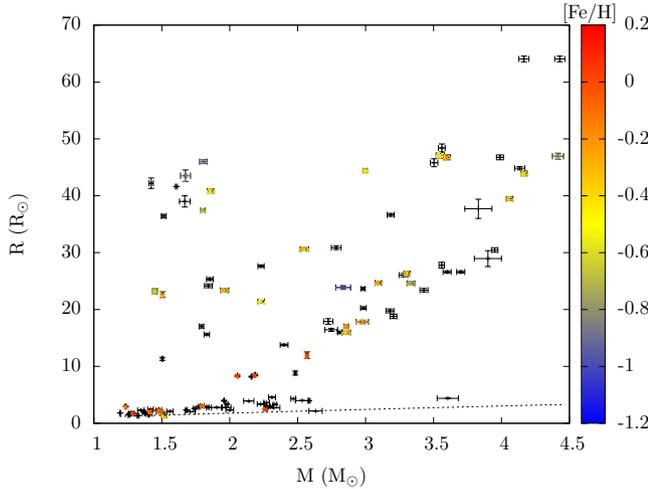


Figura 1: Masas y radios (en unidades solares) de las estrellas analizadas. A la derecha, en color, se muestra el rango de metalicidades. Aquellos sistemas que no tienen metalicidades medidas se muestran en negro. La línea punteada indica la ubicación en el plano, de estrellas de secuencia principal de edad cero.

Para computar los modelos, empleamos nuestro código de evolución estelar, descrito en Panei et al. (2007). Los ingredientes físicos que no mencionamos son los mismos que se detallan allí. Todos nuestros modelos incluyen difusión de los elementos: ^1H , ^4He , ^{12}C , ^{14}N y ^{16}O ; aún para los modelos más masivos. La pérdida de masa no fue tomada en cuenta en ninguno de los modelos. La teoría convectiva empleada es una extensión de la

MLT en donde se consideran gradientes de composición química (Grossman & Taam, 1996), y contempla cuatro regímenes de transporte de energía: radiativo, convección, semi-convección y mezcla termohalina. La formulación del OV utilizada es la de Herwig et al. (1997), en donde se asume que el coeficiente de difusión decae exponencialmente con la distancia al borde de las regiones convectivas según la ecuación:

$$D_{\text{ov}} = D_0 \exp\left(\frac{-2z}{H_v}\right), \quad (1)$$

en donde D_0 es el coeficiente de difusión en la región convectiva, z es la distancia al borde y $H_v = f_{\text{ov}} H_p$, siendo H_p la altura de presión de escala y f_{ov} un parámetro libre. Hemos adaptado nuestro código para que sólo se considere OV en el borde del núcleo convectivo, cuando este se desarrolla. El valor equivalente de la longitud de mezcla adoptado en todos nuestros modelos es de $\alpha_{\text{MLT}} = 1.824$. La distribución de elementos pesados es la de Grevesse & Sauval (1998). Adoptando el valor de $Y_p = 0.2485$ como la abundancia de helio primordial (Komatsu et al., 2011) y los valores de $(Z_{\odot}, X_{\odot}) = (0.01642, 0.714)$ como metalicidad e hidrógeno inicial del Sol, obtuvimos una relación $\Delta Y/\Delta Z = 1.28$. Usando esta relación adoptamos el valor $Y(Z) = 0.2485 + 1.28Z$ para todos nuestros modelos.

Para calibrar el valor de f_{ov} , comparamos nuestros modelos con los datos observacionales y adoptamos el valor que mejor ajuste a los datos. Consideramos que un ajuste es aceptable si el radio, la temperatura efectiva, y la metalicidad del modelo están dentro de los errores observacionales. En los modelos, permitimos hasta un máximo del 5% en la diferencia de las edades de ambas componentes del sistema. Cuando más de un caso es posible, elegimos aquel en el que las estrellas estén en etapas más longevas, siendo este el caso más probable para ser observadas. Para obtener el valor que ajuste mejor a las observaciones, en los casos en que los valores de R y T_{ef} se encuentren entre dos secuencias de nuestro grillado, realizamos una interpolación entre secuencias. Además, descartamos aquellos casos en los que la componente secundaria se encuentre más evolucionada que la primaria.

3. Resultados

Hemos computado modelos adoptando valores de f_{ov} en el rango $0 - 0.05$, con un paso de 0.002 entre cada modelo. De los 50 sistemas binarios analizados, hemos logrado ajustes aceptables en 30 de ellos. Algunos de nuestros ajustes pueden verse en las Fig. 2 y Fig. 3. Las flechas indican el sentido de la evolución en ambas figuras.

En la Fig. 2, mostramos el ajuste al sistema KIC-10031808, cuyas componentes están llegando al final de la secuencia principal. Los valores adoptados de f_{ov} para estos ajustes fueron de 0.0177 para la componente primaria y de 0.0171 para la secundaria.

En la Fig. 3, el sistema analizado es OGLE-LMC-ECL-21873, cuyas componentes se encuentran en la etapa de gigantes rojas. Los valores inferidos de f_{ov} son de

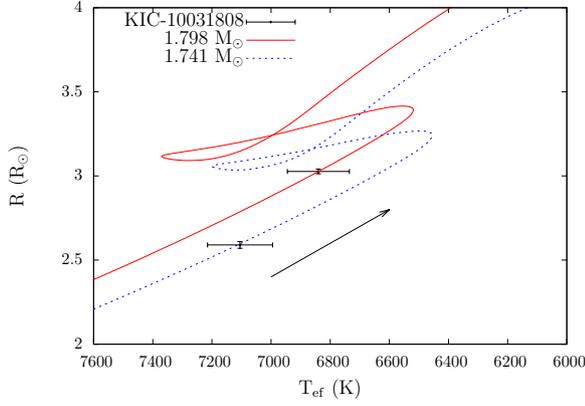


Figura 2: Ejemplo de un ajuste de nuestros modelos al sistema binario KIC-10031808 al final de la secuencia principal. Los ejes son: radio (R) en unidades solares y temperatura efectiva (T_{ef}) en K. La flecha indica el sentido de la evolución. La línea roja continua corresponde a la componente primaria mientras que la línea azul a trazos corresponde a la secundaria.

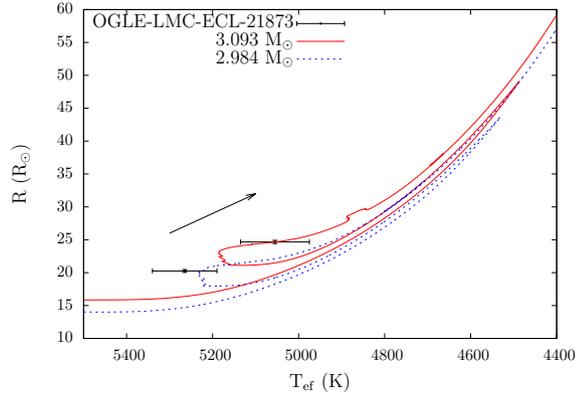


Figura 3: Al igual que en la Fig. 2, pero para el sistema OGLE-LMC-ECL-21873. En este caso las estrellas están en la etapa de gigantes rojas.

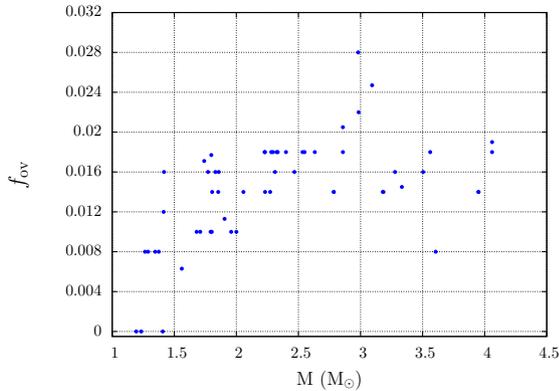


Figura 4: Valores inferidos de f_{ov} resultantes de nuestros ajustes, como función de la masa estelar (en masas solares).

0.0247 para la componente primaria y 0.022 para la secundaria.

Todos los valores inferidos de f_{ov} resultantes de los ajustes en nuestro análisis, pueden verse en la Fig. 4.

4. Discusión y Conclusiones

En este trabajo hemos estudiado si la eficiencia del OV depende de la masa al incluir procesos adicionales de mezcla. El valor de f_{ov} adoptado tiende a aumentar con la masa desde 1.1 hasta $2.5 M_{\odot}$ (ver Fig. 4), a partir de donde f_{ov} deja de crecer y toma un valor medio de ~ 0.017 .

Aunque los procesos de semi-convección y mezcla termohalina afectan al grado de eficiencia de OV necesario para lograr reproducir las observaciones, la tendencia hallada no difiere de aquella encontrada en Claret & Torres (2019), en donde dichos autores argumentan que la eficiencia del OV aumenta con la masa, en el rango $M \sim 1.2 - 2 M_{\odot}$. Además, se argumenta que el valor de f_{ov} se mantiene aproximadamente constante para masas mayores a $2 M_{\odot}$, aunque en nuestros modelos, el valor de f_{ov} tiene una dispersión notable.

Cabe destacar que el problema es degenerado, es decir, distintos valores de parámetros físicos adoptados en los modelos puede conducir a distintos resultados. Por ejemplo, podemos adoptar distintas metalicidades para el mismo sistema y lograr ajustes igualmente satisfactorios, dando lugar a distintos valores de f_{ov} . Por esto es necesario analizar una muestra grande de sistemas. Además, es importante estudiar los casos individuales, nosotros hemos verificado que en 44 de 60 estrellas, se necesita una eficiencia mayor de OV en la componente primaria para lograr ajustes aceptables, siendo esto un indicador favorable de que el OV es más eficiente cuando aumenta la masa.

Otros problemas pueden surgir de efectos no considerados, por ejemplo, la mezcla inducida por rotación puede alterar la composición química de regiones radiativas, lo que alteraría los resultados si la velocidad de rotación no es baja.

A futuro, planeamos extender nuestros resultados al total de la muestra analizada, y analizar el efecto introducido por la pérdida de masa en los valores inferidos de f_{ov} y comparar los resultados obtenidos con un nuevo análisis empleando la teoría convectiva MLT, a fin de estudiar posibles diferencias.

Agradecimientos: Los autores desean agradecer al Comité Organizador Local de la 61^o reunión anual de la AAA. FDM agradece el apoyo de Damián Bertoni y del equipo de informática de la FCAG.

Referencias

- Claret A., Torres G., 2018, ApJ, 859, 100
- Claret A., Torres G., 2019, ApJ, 876, 134
- Grevesse N., Sauval A.J., 1998, SSRv, 85, 161
- Grossman S.A., Taam R.E., 1996, MNRAS, 283, 1165
- Herwig F., et al., 1997, A&A, 324, L81
- Kato S., 1966, PASJ, 18, 374
- Komatsu E., et al., 2011, ApJS, 192, 18
- Panei J.A., et al., 2007, MNRAS, 382, 779
- Pietrinferni A., et al., 2004, ApJ, 612, 168
- Roxburgh I.W., 1965, MNRAS, 130, 223
- Roxburgh I.W., 1978, A&A, 65, 281
- Schaller G., et al., 1992, A&AS, 96, 269
- Ulrich R.K., 1972, ApJ, 172, 165