



Astrosismología de estrellas variables δ Sct y γ Dor

J.P. Sánchez Arias^{1,2}, A.H. Córscico^{1,2} & L.G. Althaus^{1,2}

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP)

² Instituto de Astrofísica de La Plata (CONICET-IALP)

Contacto/ JPSA: jsanchez@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / En este trabajo presentamos resultados preliminares de la etapa inicial de un proyecto de gran magnitud consistente en el modelado teórico de estrellas variables δ Sct y γ Dor. En esta primer etapa realizamos simulaciones numéricas de la evolución y pulsaciones de modelos estelares representativos de estas estrellas, cubriendo un amplio espacio de parámetros (masa estelar M , temperatura efectiva T_{eff} , parámetro de *overshooting* α_{OV} , metalicidad Z). Específicamente, calculamos modos de pulsación radiales y modos g y p no radiales con frecuencias de oscilación en los rangos observados para estas clases de estrellas variables. El enorme banco de frecuencias de oscilación que obtuvimos nos permitirá abordar la segunda etapa del proyecto, consistente en análisis astrosismológicos detallados de estrellas observadas corrientemente por las misiones CoRoT y Kepler, con el fin de extraer valiosa información acerca del estado evolutivo y la estructura interna de estas estrellas. Los primeros resultados de nuestro análisis ponen de manifiesto la sensibilidad de los espectros pulsacionales frente a cambios en los parámetros mencionados, evidenciando el gran potencial astrosismológico de las estrellas δ Sct y γ Dor.

Abstract / We present preliminary results of the initial stage of a large project consisting of theoretical modeling of variable stars δ Sct and γ Dor. In this first stage, we perform numerical simulations of the evolution and pulsations of stellar models representative of these stars, covering a wide range of parameter (M , T_{eff} , α_{OV} , Z). Specifically, we calculated radial pulsation modes and g and p non-radial modes with oscillation frequencies in the range observed for these kinds of variable stars. The huge bank of oscillation frequencies we obtained allow us to address the second stage of the project, consisting of detailed asteroseismic analysis of stars commonly observed by CoRoT and Kepler missions, in order to extract valuable information about the evolutionary status and internal structure of these stars. The first results of our analysis show the sensitivity of the pulsational spectra to these parameters, demonstrating the great asteroseismic potential of δ Sct and γ Dor stars.

Keywords / stars: oscillations (including pulsations) — stars: variables: delta Scuti — stars: variables: S Doradus

1. Introducción

La astrosismología es una poderosa herramienta de la astrofísica estelar que permite extraer información valiosa acerca de la masa estelar, la estructura interna, la metalicidad, la velocidad de rotación entre otras cantidades mediante la comparación de períodos pulsacionales observados y modelos teóricos computados.

En este trabajo presentamos un vasto conjunto de modelos teóricos numéricos realizados con el fin de estudiar a las estrellas δ Sct y γ Dor. Estas estrellas son variables de Secuencia Principal (SP), de tipo espectral A y F, con masas entre 1.2 y 2.2 $M_{\odot}$ aproximadamente. Las estrellas δ Sct exhiben períodos de oscilación entre 15 min y 5 hs, alcanzan temperaturas de 8600 K y presentan modos p de bajo orden radial. Las estrellas γ Dor tienen períodos entre 8 hs y 3 días, temperaturas entre 6900 K y 7500 K y oscilan con modos g de alto orden radial. Los modos p y los modos g son modos de oscilación no radiales. Los modos p exhiben altas frecuencias de oscilación, su fuerza restitutiva son los gradientes de presión y para estrellas no degeneradas su propagación se localiza en las regiones superficiales. Los modos g presentan bajas frecuencias de oscilación, su fuerza restitutiva es la flotación y su propagación está confinada a zonas cercanas al núcleo estelar. En

nuestro estudio consideramos pulsaciones adiabáticas no radiales y radiales. Los modos radiales de pulsación son un caso particular de las pulsaciones no radiales, aquel con grado armónico nulo ($l = 0$).

2. Herramientas numéricas

Los modelos generados fueron calculados con el código de evolución LPCODE desarrollado en su totalidad en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata y con el código de pulsaciones LP-PUL. Descripciones completas de las características relevantes de estas herramientas numéricas pueden hallarse en Althaus et al. (2010) y Córscico & Althaus (2006).

Dichas simulaciones fueron realizadas en el cluster de cálculo del Instituto de Física de Líquidos y Sistemas Biológicos perteneciente al Sistema Nacional de Computación de Alto Desempeño.

3. Cálculos realizados

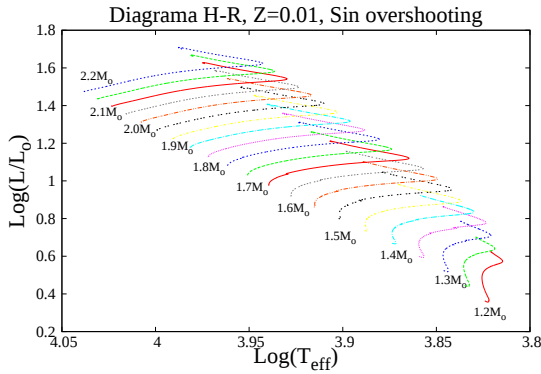
En total se calcularon 252 secuencias evolutivas, variando α_{OV} , Z y M dentro del rango razonable para este tipo de estrellas desde el punto de vista teórico y

diversas consideraciones observacionales. El *overshooting* es un fenómeno de mezcla extra que se produce más allá del borde convectivo formal predicho por el criterio de Schwarzschild y el parámetro de overshooting controla su eficiencia. Para cada secuencia, que comienza en la ZAMS (*Zero Age Main Sequence*) y finaliza en la TAMS (*Terminal Age Main Sequence*), calculamos modelos pulsacionales que contemplan modos radiales y modos no radiales con grado armónico 1, 2 y 3. La Tabla 1 especifica el espacio de parámetros considerados.

Tabla 1: Espacio de parámetros estudiados.

Cantidad	Intervalo	Variación
Masa [$M_{\odot}$]	[1.2, 2.2]	0.05
Parámetro de <i>overshooting</i>	[0, 0.03]	0.01
Metalicidad	[0.01, 0.02]	0.015
Grado armónico	[0, 3]	1
Período [s]	[1200, 300000]	—

En la Figura 1 se pueden apreciar algunas de las secuencias calculadas para el caso sin overshooting y metalicidad $Z = 0,01$.

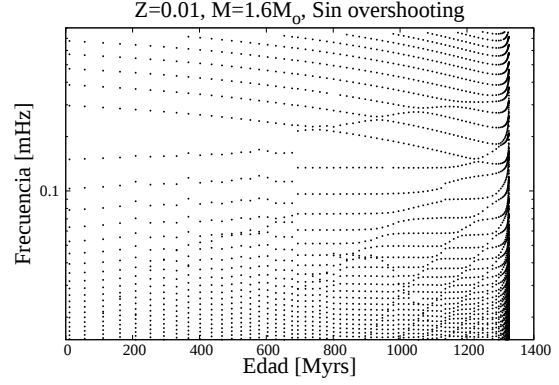

 Fig. 1: Diagrama H-R para las distintas masas consideradas entre 1.2 y 2.2 $M_{\odot}$ para el caso sin *overshooting* y $Z = 0,01$.

4. Análisis preliminares

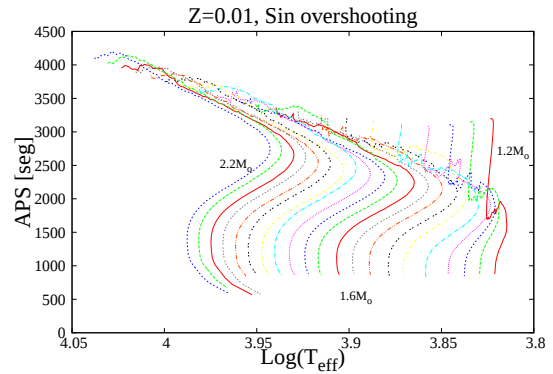
Las siguientes figuras muestran la sensibilidad de los modos pulsacionales frente a las cantidades exploradas. En la Figura 2 están representadas las frecuencias de los distintos modos de cada modelo calculado a lo largo de la SP. Para modelos cada vez más evolucionados se observa el fenómeno denominado “avoided crossing” (ver Aerts et al., 2010) el cual produce un acercamiento en las frecuencias de oscilación de los modos contiguos (en orden radial).

El espaciamiento asintótico de los períodos de modos g se define como:

$$\Delta P = P_{k+1,l} - P_{k,l} = \frac{2\pi^2}{\sqrt{l(l+1)}} \left[\int_0^R \frac{N(r)}{r} dr \right]^{-1} \quad (1)$$


 Fig. 2: Evolución temporal de las frecuencias de pulsación correspondientes a los modos de presión y gravedad, en función de la edad para una estrella con 1.6 $M_{\odot}$, $Z = 0,01$, sin *overshooting* y grado armónico $l = 1$.

donde k es el orden radial, l el grado armónico y N la frecuencia de Brunt-Väisälä. Esta expresión es válida para ordenes radiales altos y, como se puede ver, el espaciamiento de períodos de modos g resulta constante para un dado valor de l (Tassoul, 1980) y se denomina espaciamiento de períodos asintótico. Esta cantidad es medible para aquellas estrellas que oscilan en modos g con altos ordenes radiales, como ocurre por ejemplo con algunas estrellas híbridas (Henry & Fekel, 2005). En la Figura 3 está representada la evolución del espaciamiento asintótico de períodos a lo largo de la SP de estrellas con masa entre 1.2 y 2.2 $M_{\odot}$ para el caso con $Z = 0,01$ y sin *overshooting*.


 Fig. 3: Dependencia de la evolución del espaciamiento de períodos asintóticos con la masa para el caso con $Z = 0,01$ y sin *overshooting*.

Con el fin de explorar la dependencia del espaciamiento de períodos asintótico con la metalicidad, en el panel superior de la Figura 4 graficamos los resultados obtenidos para el caso con 1.6 $M_{\odot}$ y sin *overshooting*. Con el mismo objetivo para el estudio del comportamien-

to de esta cantidad frente a variaciones en el parámetro de overshooting, en el panel inferior de la misma figura, consideramos distintos α_{OV} para el caso de una estrella con $1.6 M_{\odot}$ y $Z = 0,01$.

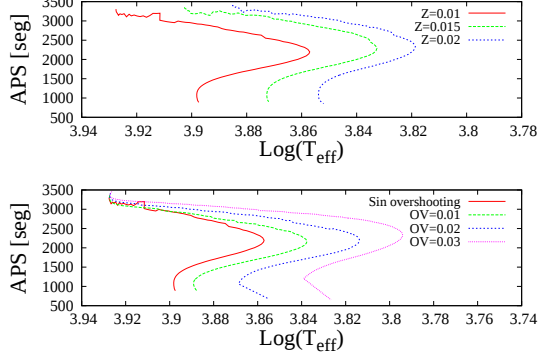


Fig. 4: Dependencia de la evolución del espaciamento de períodos asintóticos con: *panel superior*: la metalicidad para el caso con $1.6 M_{\odot}$ sin *overshooting*; *panel inferior*: el *overshooting* considerando $1.6 M_{\odot}$ y $Z = 0,01$.

En las siguientes figuras se muestra el comportamiento del espaciamento de períodos (Figura 5) y el espaciamento de frecuencias (Figura 6) que presenta un modelo de $1.6 M_{\odot}$ con $Z = 0,01$, $\alpha_{OV} = 0,01$ y una temperatura efectiva $T_{eff} = 7994$ K para distintos valores del grado armónico l .

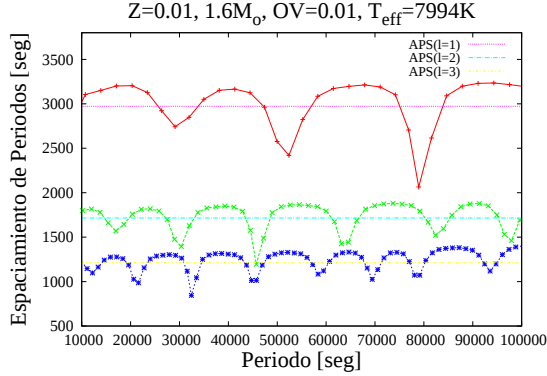


Fig. 5: Espaciamento de períodos para $1.6 M_{\odot}$ con $Z = 0,01$ y $\alpha_{OV} = 0,01$ cuando $T_{eff} = 7994$ K.

5. Discusión y trabajos futuros

Los primeros resultados de nuestro análisis ponen de manifiesto la sensibilidad de los espectros pulsacionales frente a cambios en los parámetros estudiados, evidenciando el gran potencial astrosismológico de las estrellas δ

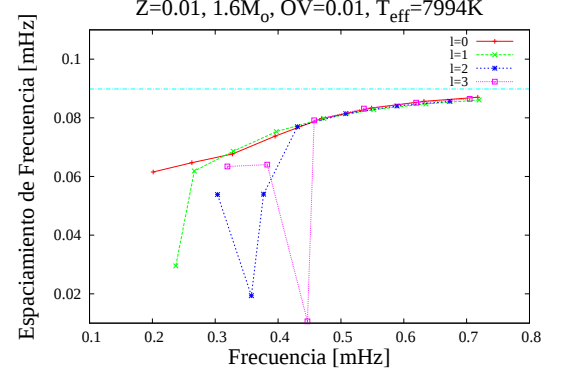


Fig. 6: Espaciamento de frecuencias para el mismo caso que la Figura 5.

Sct y γ Dor. Los análisis preliminares obtenidos son consistentes con estudios realizados en diversos trabajos por distintos autores, e.g. Kurtz et al. (2014) y Miglio et al. (2008). El enorme banco de frecuencias de oscilación que obtuvimos nos permitirá abordar la segunda etapa de este proyecto, consistente en análisis astrosismológicos detallados de estrellas observadas corrientemente por las misiones CoRoT y Kepler, con el fin de extraer valiosa información acerca del estado evolutivo y la estructura interna de estas estrellas.

Referencias

- Aerts C., Christensen-Dalsgaard J., Kurtz D. W., 2010, Asteroseismology
- Althaus L. G., et al., 2010, A&A Rev., 18, 471
- Córsico A. H., Althaus L. G., 2006, A&A, 454, 863
- Henry G. W., Fekel F. C., 2005, AJ, 129, 2026
- Kurtz D. W., et al., 2014, MNRAS, 444, 102
- Miglio A., et al., 2008, MNRAS, 386, 1487
- Tassoul M., 1980, ApJS, 43, 469