

Resumen

La temática de esta Tesis está orientada hacia el estudio de las propiedades pulsacionales de las estrellas variables ZZ Ceti desde un punto de vista teórico-numérico.

Las estrellas ZZ Ceti son enanas blancas de tipo espectral DA (con atmósferas ricas en hidrógeno) las cuales, durante su lento enfriamiento, experimentan inestabilidades pulsacionales al atravesar el rango de temperaturas efectivas comprendido entre los 10700 y 12500 K (“banda de inestabilidad”). Tales inestabilidades pulsacionales son interpretadas como oscilaciones globales en modos g (gravedad) no-radiales. Estas oscilaciones se traducen en variaciones fotométricas multiperiodicas observables con amplitudes de hasta 0.30 magnitudes en las curvas de luz, y períodos entre 100 y 1200 segundos.

Una de las motivaciones más importantes para estudiar estrellas pulsantes en general radica en la posibilidad de extraer información de su estructura interna y estado evolutivo a través del análisis de su espectro pulsacional. Esta técnica es análoga en su esencia a la tan conocida sismología en geofísica. El principio básico (muy antiguo en la historia de la física) es estudiar cómo un sistema vibra para luego inferir sus propiedades estructurales. En el caso de las estrellas, esta metodología se enmarca en la disciplina denominada *astrosismología*. Cabe destacar que a través de técnicas astrosismológicas aplicadas al Sol (*heliosismología*) se ha podido obtener en recientes años información extremadamente valiosa acerca de su interior, tal como el perfil interno de rotación, la marcha de la velocidad del sonido y la extensión de la zona convectiva superficial, entre otros importantes resultados.

La clase más fructífera de estrellas variables en lo que respecta a estudios astrosismológicos (a excepción del caso único del Sol), es la de las ZZ Ceti, también denominadas frecuentemente como DAVs. Esto se debe en parte a que tales estrellas son pulsadores de baja amplitud, un hecho que, a diferencia de las variables clásicas como las Cefeidas, RR Lira y Mira, permite estudiarlas en el marco de la teoría lineal de oscilaciones estelares. La primer estrella ZZ Ceti (HL Tau 76) fue descubierta por A. Landolt en el año 1968, y desde entonces este tipo de variables a sido objeto de intensos estudios tanto desde el punto de vista observacional como desde el lado teórico. En la actualidad se conocen más de 30 miembros de esta clase bien establecida de estrellas variables. Las variables ZZ Ceti presentan una gran atractivo para los astrónomos: son pulsantes multiperiodicas, lo cual implica que una gran riqueza de información está presente en sus curvas de luz. En efecto, los distintos modos de pulsación son sensibles a distintas regiones del interior de la estrella. Esto equivale a decir que *diferentes* períodos de pulsación (la principal cantidad observable de las estrellas pulsantes) contienen información implícita acerca de *diferentes* regiones de la estructura estelar. Es importante mencionar, sin embargo, que este carácter multiperiodico torna muy compleja la tarea de interpretar las curvas de luz, y grandes esfuerzos en este sentido han sido realizados en la última década por parte de los astrónomos.

Otro punto a destacar en favor de las variables ZZ Ceti es que, excepto por su variabilidad, son enanas blancas DA completamente normales. Esto tiene la importante consecuencia de que cualquier información que uno pueda inferir acerca de la estructura de las ZZ Ceti debe tener validez también para el resto de la población de enanas blancas DA, no-variables.

Es importante destacar aquí la gran importancia de estudiar la estructura y evolución de estrellas enanas blancas. En primer lugar, estas estrellas constituyen la etapa final más común en la evolución estelar, y esto las provee de un atractivo intrínseco a los ojos de los investigadores. En segundo lugar, un conocimiento más profundo de las propiedades de estas estrellas es deseable para explorar el comportamiento de la materia en condiciones extremas de densidad y temperatura (inaccesibles actualmente en laboratorios terrestres). Pero existen atractivos adicionales, en un contexto astrofísico más general. De acuerdo a la teoría de evolución estelar, las enanas blancas son el producto final de procesos que provocan que estrellas de la secuencia principal (con masas menores a ocho veces la masa del Sol) evolucionen a través de la Rama de las Gigantes (GB) y la Rama Asintótica de las Gigantes (AGB), quedando finalmente un remanente que identificamos como enanas blancas. Las fases de evolución sobre la GB y la AGB no son bien entendidas hasta el presente, con lo cual el estudio de las enanas blancas permite, en principio, obtener información acerca de los procesos que experimentan los progenitores de dichas estrellas durante tales etapas evolutivas. Otra importante motivación para estudiar estos objetos compactos reside en la posibilidad de estimar la edad del disco galáctico local. En efecto, la velocidad de enfriamiento de una enana blanca depende de la composición química de su núcleo. Conocer esta tasa de enfriamiento implica, en principio, conocer sus edades. Si tenemos en cuenta que las enanas blancas más frías son los objetos más antiguos de la galaxia, entonces sus edades nos informan, en principio, acerca del instante de formación de la primer generación de estrellas en Vía Láctea. Así, el estudio de las enanas blancas nos permite estimar (en forma indirecta) la edad del disco galáctico local.

Un aspecto de crucial importancia en astrosismología es el modelado de las configuraciones en equilibrio. Para poder extraer información de las propiedades pulsacionales observadas es necesario un modelado muy detallado de las estrellas. En este sentido, en nuestro Observatorio existe un grupo de investigación que desde hace largo tiempo está abocado al estudio de la evolución estelar, y en particular, a la evolución de estrellas enanas blancas. Dada la amplia experiencia acumulada por dicho grupo en este sentido, hemos decidido comenzar en nuestra Institución el estudio de pulsaciones en estrellas enanas blancas desde un punto de vista numérico.

El comienzo de esta Tesis provee al lector de un Capítulo introductorio conteniendo una reseña histórica acerca del desarrollo de la teoría de pulsaciones estelares, junto con definiciones básicas inherentes a las pulsaciones no-radiales. Una derivación detallada de las ecuaciones que gobiernan el problema en la aproximación adiabática-lineal es provista en el Apéndice A. En el Capítulo 2 describimos los modelos evolutivos de enanas blancas que empleamos en nuestros cálculos pulsacionales. Los modelos estelares empleados en esta Tesis corresponden a dos grupos: en el primero, las estructuras son calculadas teniendo en cuenta los efectos de la difusión dependiente del tiempo y la acción de reacciones term nucleares, partiendo de modelos iniciales en alguna medida artificiales a muy altas temperaturas, pero que posteriormente convergen a la estructura térmica y mecánica correspondiente a estrellas enanas blancas. Estos modelos son empleados en los Capítulos 4, 5 y 6. El segundo conjunto corresponde a una nueva generación de modelos los cuales tienen en cuenta también la historia evolutiva previa completa de las enanas blancas, partiendo desde la secuencia principal de edad cero (ZAMS) hasta llegar al régimen de las ZZ Ceti. Estos nuevos modelos son analizados pulsacionalmente en el Capítulo 6. En el Capítulo 3 de la Tesis una descripción detallada del es-

quema numérico empleado para resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan el problema adiabático es dada. En este mismo Capítulo se incluye un estudio del comportamiento de nuestro código aplicándolo a modelos estelares sencillos (esferas politrópicas), y una comparación de nuestros resultados con aquellos publicados en la literatura. También se incluye en este Capítulo un estudio pulsacional de estrellas enanas blancas de helio de baja masa, con el objeto de explorar el comportamiento de los modos propios de alto orden en objetos estelares químicamente homogéneos. Para esto hemos acoplado el código de pulsaciones al código de evolución de enanas blancas. Nuestros resultados están en muy buen acuerdo con lo que predice la teoría asintótica de pulsaciones no-radiales. El Capítulo culmina con el estudio de un problema puntual relacionado con la física de partículas fundamentales. Específicamente hemos empleado nuestro código de evolución-pulsación para obtener la evolución de modelos de enfriamiento de enanas blancas en el caso en que éstas poseen una fuente adicional de liberación de energía: emisión de *axiones*. Dichas partículas, cuya existencia fue predicha teóricamente hace varias décadas, son actualmente consideradas como serias candidatas a conformar parte de la materia oscura del Universo. En nuestro estudio obtenemos una cota inferior para la masa de los axiones. El Capítulo 4 contiene un estudio astrosismológico detallado de la estrella ZZ Ceti G117-B15A en el marco de nuestro nuevo tratamiento de las abundancias químicas (considerando difusión dependiente del tiempo), y proporciona una comparación de nuestras predicciones con los resultados independientes obtenidos por otros autores. En el Capítulo 5 exploramos el efecto de la difusión dependiente del tiempo sobre las variaciones seculares de los períodos de oscilación, una importante cantidad (actualmente medible en algunas estrellas ZZ Ceti) relacionada con la escala de tiempo evolutiva de las enanas blancas DA. En el Capítulo 6 estudiamos exhaustivamente el fenómeno de “atrapamiento de modos” (*mode trapping*) en esta clase de estrellas. Dicho fenómeno implica que algunos modos propios de oscilación están confinados en la envoltura de hidrógeno, mostrando muy baja amplitud de oscilación en las regiones más internas de los objetos. En este contexto, es aceptado corrientemente el argumento de que los modos atrapados en la envoltura son los únicos capaces de, una vez excitados, alcanzar amplitudes observables. Dado que este fenómeno de resonancia de los modos está íntimamente ligado a la forma precisa de las interfases de composición química, es nuestro interés evaluar cómo se ve afectada la efectividad de selección de modos cuando tales interfases químicas son el resultado de cálculos que contemplan la difusión química dependiente del tiempo. Nuestros resultados indican que el fenómeno de *mode trapping* resulta fuertemente debilitado debido a la forma muy suave de las interfases de composición química, una consecuencia directa de nuestro tratamiento de la difusión de elementos. El Capítulo final sintetiza los principales resultados de nuestro trabajo y los proyectos futuros.