

viados por el satélite en imágenes, curvas de luz y espectros, debido principalmente a que los tres instrumentos de alta energía son telescopios de máscaras codificadas.

La tesis se divide en dos partes. En la primera parte se describe el software de análisis científico del monitor de rayos X (JEM-X). El trabajo presentado en esta primera parte es consecuencia del estudio de las herramientas de análisis de JEM-X, su validación científica durante las primeras fases de la misión y el desarrollo y mantenimiento de los guiones (“*scripts*”) de análisis del monitor.

En la segunda parte de la tesis se presentan los resultados del análisis de los datos de INTEGRAL para el enigmático sistema binario de rayos X Cygnus X-3. Este sistema ha sido observado desde los comienzos de la astronomía de rayos X, pero su naturaleza es todavía desconocida. Esta tesis proporciona nuevas claves para resolver la misteriosa naturaleza de la fuente.

Los principales objetivos del estudio presentado en esta parte de la tesis han sido:

- Localización de la fuente mediante la obtención de imágenes en diferentes bandas de energía. INTEGRAL permite localizar e identificar fuentes de rayos X y  $\gamma$  con una precisión sin precedentes.
- Estudio de la variabilidad del flujo de la fuente en diversos rangos energéticos, en función del tiempo y de la fase orbital del sistema.
- Caracterización del estado espectral de la fuente en nuestro período de observación y sus variaciones en función del tiempo y de la fase orbital.

principalmente en el llamado estado alto de intensidad, excepto durante un par de días de observación, detectándose modulación orbital desde 5 keV hasta 40 keV. Los diagramas color-fase muestran variabilidad de los colores indicando un endurecimiento del estado de la fuente conforme la luminosidad decrece. El análisis espectral nos confirma que la fuente se encuentra en un estado alto/blando excepto durante un par de días donde muestra un estado más bajo/duro. Durante el estado alto la fuente presenta variaciones espectrales con la fase orbital caracterizadas por: aumento de la anchura equivalente de la línea de emisión del Fe conforme la luminosidad decrece, presencia de un exceso de rayos blandos que no varía con la fase, aumento de la opacidad conforme la luminosidad disminuye y aumento del índice espectral de la ley de potencias ajustada conforme la luminosidad aumenta.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo indican la presencia de un halo de acrecimiento en el disco (“*Accretion Disk Corona*”), donde la transición observada a un estado más bajo/duro es debida a cambios en la opacidad y la densidad electrónica de la corona. Mientras que las variaciones orbitales detectadas son debidas a la presencia de una distribución no uniforme de electrones térmicos y no-térmicos en el halo. La ocultación parcial de la corona conlleva a la detección de regiones con distinta ionización del halo.

Por último, mencionar que, atendiendo a nuestros resultados, la modulación de la emisión en X no puede ser debida a un fenómeno de absorción como sugieren diversos autores.

*La tesis puede descargarse en formato PDF en la dirección:* <http://castor.uv.es/who/smartinez.htm>.

## Modos de Oscilación en Estrellas con Simetría Axial

Francisco Espinosa Lara

fel@iac.es

Tesis doctoral dirigida por Fernando Pérez Hernández y Teodoro Roca Cortés

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias

Fecha de lectura: 18 de Marzo de 2005

La rotación juega un papel importante en la estructura y evolución de las estrellas. La mayoría de las estrellas con tipos espectrales más tempranos que el Sol presentan altas velocidades de rotación. Por

ello, si queremos aplicar las técnicas de la *Astrosismología* al estudio de estas estrellas, debemos comprender cómo afecta la rotación a las oscilaciones estelares. En la actualidad, existe una gran canti-

cilación, aunque su estructura no está aún bien entendida. Desafortunadamente los métodos disponibles hasta la fecha para calcular las oscilaciones en estrellas en rotación se basan en técnicas perturbativas, las cuales solamente son válidas para velocidades de rotación bajas. El objetivo de esta tesis doctoral es la elaboración de un algoritmo matemático y el correspondiente código numérico (OMASS2d) para calcular los modos acústicos de oscilación en una estrella cuya estructura está fuertemente deformada por la rotación.

Partiendo de las ecuaciones de los fluidos en un caso de simetría axial y, realizando ciertas aproximaciones (aproximación de Cowling, oscilaciones acústicas, despreciar la fuerza de Coriolis) se ha obtenido la ecuación de oscilación que gobierna el comportamiento de las perturbaciones adiabáticas en el interior de la estrella. Gracias a las aproximaciones realizadas, es posible escribir esta ecuación en términos de una única variable escalar,  $\psi$ , que describe las autofunciones:

$$c^2 \Delta \psi + \left( 2\nabla c^2 - \frac{\nabla p_0}{\rho_0} \right) \nabla \psi + \left[ \Delta c^2 - \operatorname{div} \left( \frac{\nabla p_0}{\rho_0} \right) \right] \psi = -(\omega - m\Omega)^2 \psi. \quad (1)$$

A diferencia del caso sin rotación (con simetría esférica), la ecuación no es separable por lo que es necesario resolver el problema de valores propios en un recinto bidimensional, y además el grado  $l$  ya no es un parámetro de la ecuación, lo cual complica la clasificación de los modos resultantes del cálculo. Para la resolución se ha utilizado un método de diferencias finitas implícito, empleando el método de Arnoldi implícitamente reinicializado para calcular los valores y vectores propios de la matriz asociada. Para comprobar la fiabilidad del código, se han realizado varias pruebas en diversos escenarios para los cuales se puede conocer la solución de manera independiente, obteniendo en todos los casos resultados satisfactorios.

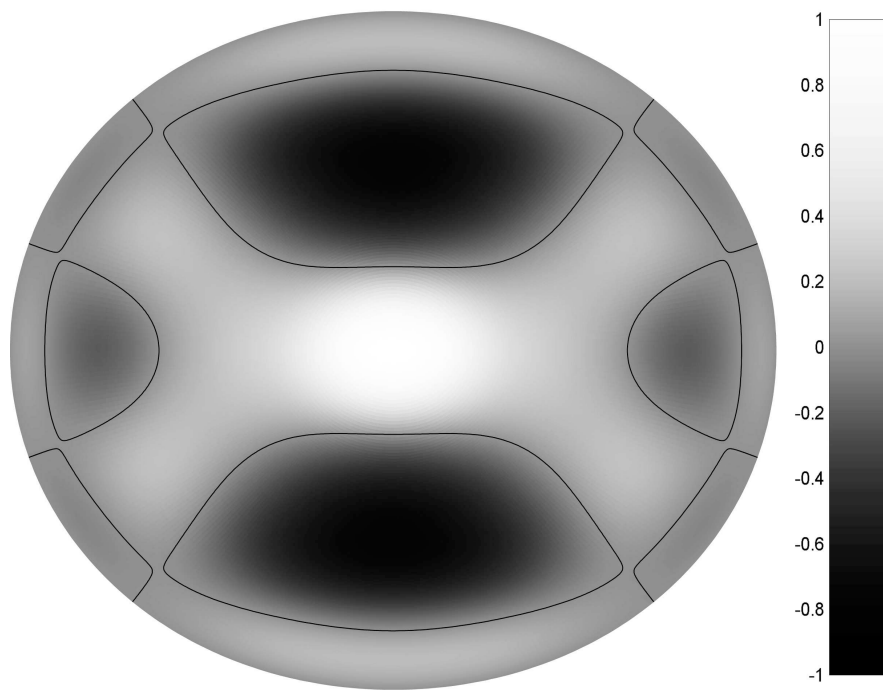


Figura 1 — Ejemplo de autofunción para una estrella de  $1.8 M_{\odot}$  con rotación elevada (78 % de la velocidad de rotura). Corresponde a un modo clasificado como  $(n, l, m) = (1, 4, 0)$ . Se representa un corte transversal en un plano meridiano.

Utilizando este nuevo código se han calculado los modos de oscilación para dos conjuntos de modelos estelares. El primero está compuesto por modelos estelares con densidad uniforme, para los que se dispone de una amplia muestra de veloci-

dades de rotación. El segundo lo componen tres modelos basados en una física realista con diferentes velocidades de rotación, calculados por A. Claret (Claret, 1999). Para ambos conjuntos se han obtenido conclusiones similares:

pecto al plano del ecuador. Los modos antisimétricos tienden a aumentar su frecuencia respecto a los simétricos.

- La estructura de los multipletes (igual  $n$  y  $l$ ) viene determinada principalmente por dos efectos. Un efecto de compresión, según el cual la distancia entre las frecuencias de los modos del multiplete disminuye hacia la parte superior de éste, y un efecto de apareamiento entre las frecuencias de modos consecutivos de distinta paridad.
- En la aproximación utilizada, las frecuencias de los modos de igual  $l$  y  $m$  están igualmente espaciadas en frecuencia.
- Se observan fenómenos de acoplamiento en-

clasificación.

- La visibilidad de los modos está fuertemente afectada por el acoplamiento, siendo frecuente que la estructura superficial de los modos sea distinta a la que poseen en las zonas internas de la estrella.

Todos los efectos descritos son más importantes en el rango de  $l$  bajo y alta frecuencia, acentuándose a medida que aumenta la velocidad de rotación. Estas conclusiones pueden ser de gran ayuda para la clasificación de los espectros de oscilaciones observados en estrellas con velocidades de rotación elevadas, como por ejemplo las estrellas de tipo  $\delta$  Scuti.

## Discos protoplanetarios durante la etapa de formación de planetas

Aurora Sicilia-Aguilar

asicilia@cfa.harvard.edu

**Tesis doctoral dirigida por** Director: Lee Hartmann — Tutor: Carlos Eiroa

**Centro:** Universidad Autónoma de Madrid — Smithsonian Astrophysical Observatory

**Fecha de lectura:** 8 de junio de 2005

Este trabajo comprende el estudio de poblaciones de estrellas jóvenes y de sus discos protoplanetarios, con edades entre 1 y 10 millones de años, pertenecientes a la etapa en la cual los discos circumstelares se disipan, probablemente tras formar sistemas planetarios. La época entre los 3 y los 10 millones de años presenta un interés particular, puesto que, debido a la ausencia de cúmulos y regiones cercanas en este rango de edades, existe una carencia sistemática de datos acerca de los procesos que tienen lugar en los discos durante la misma. Los instrumentos de nueva generación, que incluyen los espectrógrafos multifibra Hectospec y Hectochelle, operativos en el telescopio de 6.5m MMT (*Multiple Mirror Telescope, Mount Hopkins, Arizona*), y el Telescopio Espacial Spitzer, han abierto recientemente una nueva ventana para la investigación de estas regiones más distantes. Este estudio forma parte de un programa para trazar la evolución de los discos protoplanetarios durante las etapas cruciales (de 1 a 10 millones de años) para entender los procesos que llevan a la disipación de los discos y a la formación de sistemas planetarios.

En primer lugar, se presentan los resultados de las

observaciones en longitudes de onda ópticas y JHK en dos cúmulos jóvenes en la Asociación de Cep OB2: Tr 37 (el cual está embebido en la región H II IC 1396), y NGC 7160. Usando espectros ópticos de baja resolución tomados con el espectrógrafo Hectospec, se ha identificado un total de  $\sim 165$  y  $\sim 50$  estrellas de baja masa pertenecientes a Tr 37 y NGC 7160, respectivamente (usando la línea de Li a  $6707 \text{ \AA}$  y la emisión en  $H\alpha$ ). La fracción de estrellas de baja masa con discos de acrecimiento es de  $\sim 43\%$  en Tr 37, mientras que sólo una estrella en NGC 7160 presenta indicadores de acrecimiento activo. La fotometría en el óptico, junto con las correspondientes isocronas teóricas, permite la estimación de las edades de Tr 37 y NGC 7160, 4 y 12 millones de años, respectivamente.

La presencia de discos protoplanetarios en Cep OB2 se infiere a través de los datos del Spitzer, pertenecientes a un programa con Tiempo de Observación Garantizado (GTO) destinado al estudio de la evolución de los discos. Las observaciones del Spitzer (IRAC y MIPS,  $3.6\text{--}24.0 \mu\text{m}$ ) permiten determinar la presencia y las características de los discos en el rango de distancias de  $\sim 0.1$  a 20