

## MODELOS DE ESTRUCTURA ESTELAR

En esta práctica calcularemos teóricamente algunos modelos de estructura interna de estrellas para diferentes elecciones de la masa y composición química. Estudiaremos la estructura estelar resultante en función de estos parámetros, construiremos un diagrama H-R teórico y lo compararemos con el observacional obtenido en el cúmulo abierto de las Pléyades.

El *disquette* adjunto debe contener los siguientes programas:

- ZAMS.F = Programa FORTRAN para construir los modelos
- ZAMS.EXE = Ejecutable para PC sobre MS-DOS o Windows
- MODIN.001 = Ejemplo de fichero de entrada para un modelo de  $1 M_{\odot}$

El programs ZAMS.F calcula modelos de estructura interna (un modelo por cada ejecución del programa) de estrellas en la **Edad Cero de la Secuencia Principal** (Zero Age Main Sequence, ZAMS) es decir, en el momento en que la estrella alcanza el equilibrio hidrostático obteniendo su fuente de energía mediante la transformación de H en  ${}^4\text{He}$ . El programa ZAMS.F está escrito en caracteres ASCII y corresponde al lenguaje FORTRAN estándar. Este ha sido compilado y ejecutado en diferentes sistemas operativos (MS-DOS, Windows, Unix, Linux etc) satisfactoriamente, por lo que no deberá haber ningún problema al ejecutarlo en cualquiera de estos sistemas. Por lo tanto, en principio no será necesario (ni se recomienda) modificar este programa. Se adjunta el fichero ZAMS.EXE, ejecutable en MS-DOS y/o Windows obtenido usando el *Microsoft Fortran Compiler 5.0*. Si se quiere utilizar en otro sistema operativo habrá que compilar previamente ZAMS.F con el compilador FORTRAN correspondiente para crear el fichero ejecutable. El tiempo de ejecución del programa ZAMS.F dependerá del modelo de PC que se esté utilizando. Por ejemplo, para un PC-386 a 20 MHz el modelo de  $1 M_{\odot}$  tarda unos 5 minutos en completarse. Para modelos de PC más avanzados el tiempo de ejecución se reduce considerablemente.

El fichero MODIN.001 contiene un ejemplo de lo que el alumno debe introducir por pantalla para la ejecución del modelo de  $1 M_{\odot}$ . Los datos de entrada que sucesivamente va pidiendo el programa son:  $X$  fracción en masa de hidrógeno,  $Y$  fracción en masa de  ${}^4\text{He}$  (el resto hasta la unidad, el programa supone que es la metalicidad de la estrella  $Z = 1 - X - Y$ ). A continuación, el programa solicita una estimación inicial para la *Presión Central*, *Temperatura Central*, *Radio* (todo ello en unidades CGS) y *Luminosidad Total* (expresada como  $L/L_{\odot}$ ). Estas estimaciones deberemos calcularlas en cada caso a partir de las expresiones teóricas deducidas en clase o directamente de la bibliografía adecuada. Este punto es crítico ya que cuanto más nos acerquemos en estas estimaciones a los valores *reales* el programa se ejecutará más rápidamente sin necesidad de excesivas iteraciones. Si los valores iniciales que introducimos son muy alejados a la realidad, el programa *no converge y no encontrará solución*. A continuación, el programa pregunta

al usuario por el nombre del fichero de salida (se le puede dar cualquiera) y finalmente si se desea hacer un cálculo de *pulsación estelar*. A esta última pregunta responderemos simplemente con  $N$ .

El programa comenzará en este momento a ejecutarse mostrando por pantalla información sobre el proceso de convergencia en las sucesivas iteraciones. Esta información normalmente no será necesaria, pero en caso de no convergencia nos podría ser útil a fin de investigar la causa. Una vez terminada la ejecución podremos estudiar nuestro fichero de salida. En él encontraremos en las primeras líneas los parámetros iniciales del modelo, información sobre el proceso de convergencia y, a partir del mensaje `****FINAL MODEL****`, encontraremos el modelo estelar calculado. La primera columna da la masa relativa interior a la superficie  $1 - m(r)/M$ , donde  $m(r)$  es la masa interior al radio  $r$ . Las otras columnas muestran en logaritmo decimal, el radio (R), presión (P), temperatura (T), densidad (RHO) y luminosidad interior a un radio  $r$ ,  $l(r)$ . El segundo bloque de columnas lista, también en expresión logarítmica, el ritmo de generación de energía (EPS), la opacidad (OP), la luminosidad transportada por convección ( $L_c$ ), el cociente entre la luminosidad convectiva y la luminosidad total ( $L_c/L_{tot}$ ), el gradiente de temperatura real  $\nabla_{real}$  (DEL), el gradiente de temperatura adiabático  $\nabla_{adb}$  (DELAD) y finalmente el gradiente de temperatura radiativo  $\nabla_{rad}$  (DELRAD). Con toda esta información el alumno debería ser capaz de saber que está ocurriendo en el interior del modelo estelar calculado.

## Resultados

En esta práctica calcularemos:

- Modelos de interior estelar para 1 y 5  $M_{\odot}$  correspondientes a estrellas de Población I y II.
- Representaremos en un diagrama H-R la posición  $L - T_{ef}$  de los modelos anteriormente calculados. Este diagrama lo compararemos con el obtenido para el cúmulo de las Pléyades en una práctica anterior.
- Representar gráficamente para los modelos calculados el comportamiento de  $T, \rho, \epsilon, \nabla_{rad}, \nabla_{adb}$  y  $\nabla_{real}$  frente a  $1 - m(r)/M$ . ¿Qué conclusiones sacamos de la estructura de la estrella dependiendo de su masa y composición química?
- Explicar la causa de la diferente posición en el diagrama H-R de las estrellas de Población I y II.
- ¿Qué podemos decir de las masas de las estrellas que constituyen las Pléyades?