

## PRÁCTICA 2

### Determinación de Masas mediante Curvas de Velocidad Radial

#### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la masa mínima de *compañeros oscuros* de estrellas.
- Discutir si se pueden clasificar a estos compañeros como planetas, estudiando los límites entre planetas gigantes y estrellas enanas.

#### CONCEPTOS CLAVE:

Detección de exoplanetas por Doppler: curvas de velocidad radial. Período y semieje de la órbita. Leyes de Kepler. Ecuaciones de movimiento circular uniforme. Límite planeta gigante – estrella enana.

#### I). MATERIALES

- Curvas de velocidad radial vs tiempo para las estrellas 16CyB y 47UMa (disponibles en EVA).
- Tablas de masas y *semiplitudes Doppler* para estas estrellas.

#### II). PROCEDIMIENTO

Se estimarán las masas de dos objetos subestelares que orbitan en torno a las estrellas 16CyB y 47UMa, en base a datos reales de velocidad radial en función del tiempo. Se hallarán para esto períodos orbitales, distancias medias (semiejes) y velocidades de las estrellas y sus compañeros. Se evaluarán las masas calculadas para determinar si estos objetos son planetas o estrellas enanas

### 1. Determinación del periodo del objeto desconocido

En primer lugar, determinará el período de rotación  $P$  del objeto desconocido que está orbitando a cada estrella, a partir de las curvas de velocidad radial. Para esto, siga el siguiente procedimiento:

- Cargue los datos de ambas curvas en TOPCAT (archivos "curva\_16\_Cygni\_B.csv" y "curva\_47\_Ursae\_Majoris.csv"). En estas tablas se encuentran los datos del ajuste (línea negra) a las medidas de la velocidad radial de cada estrella (puntos rojos), mostrados en el Anexo 1.
- Grafique dicha curva y seleccione con el cursor dos puntos característicos de la curva que permitan determinar el período (dos crestas o dos valles).
- Al seleccionar cada punto con el cursor en la gráfica, TOPCAT indicará automáticamente las filas correspondientes en la tabla de datos. Utilice esta funcionalidad para calcular la diferencia de tiempos entre estos dos puntos y así estimar el período  $P$  (en años) de estas dos estrellas.
- ¿Las órbitas de estas estrellas son circulares o elípticas? Esto se puede deducir estudiando visualmente las gráficas.
- Calcular, a partir de la tercera ley de Kepler y de los períodos medidos, el semieje mayor  $a$  de la órbita:

$$P^2 = k \times a^3 \quad (1)$$

Si  $P$  está dado en años y  $a$  en ua,  $k$  es simplemente el inverso de la masa de la estrella (en masas solares). Para las estrellas 16 CyB y 47 UMa, las masas se muestran en el Cuadro 1.

### 2. Determinación de la masa mínima del compañero estelar

Se considera la *masa mínima*, porque existe la incertidumbre del ángulo que forma el plano principal de la órbita respecto a nuestra línea de la visual del observador (inclinación). Las proyecciones de la velocidad no son las mismas si vemos al sistema "de canto" que "de frente", por lo cual hay un factor  $\sin(i)$  que cuenta en la determinación de la masa.

De todas maneras, se calculará la masa mínima posible, sin tener en cuenta esta inclinación. Al no conocer la inclinación del sistema, la masa calculada corresponderá a la masa mínima posible. Para estimarla, aplique la ecuación del baricentro (centro de masas) del sistema. Si consideramos al baricentro como origen del sistema de referencia, se cumple:

$$0 = M_p x_p + M_* x_* \quad (2)$$

Donde  $M_p$  es la masa del objeto subestelar (la incógnita),  $x_p$  es la posición del objeto respecto al baricentro, y  $M_*$  y  $x_*$  son la masa (conocida) y la posición de la estrella.

Si derivamos la ecuación (2) respecto al tiempo tenemos:

$$0 = M_p v_p + M_* v_* \quad (3)$$

Donde  $v_p$  es la velocidad del objeto subestelar, y  $v_*$  es la velocidad de la estrella.

- Estime la semiamplitud de la curva de velocidad radial de ambas estrellas y tome esta semiamplitud como estimación de la velocidad de la estrella respecto del baricentro del sistema. Note que esto es válido para un movimiento circular, donde el comportamiento de la velocidad radial será sinusoidal. ¿Por qué la semiamplitud es un buen estimado de la velocidad respecto del baricentro?
- Estime el error en la velocidad radial de la estrella  $v_*$  midiendo la dispersión de las medidas de la velocidad radial respecto de la curva de ajuste. Las medidas se encuentran en los archivos “medidas\_16\_Cygni\_B.csv” y “medidas\_47\_Ursae\_Majoris.csv”. Para hacerlo, usando TOPCAT mida la diferencia en velocidad entre una de las medidas y el punto más cercano de la curva de ajuste. Repita esta medida unas diez veces y tome el promedio de las diferencias como su estimado del error  $\Delta v_*$ .
- A partir de los semiejes obtenidos en la Parte 1 y de la masa de la estrella de la Tabla 1, calcule la velocidad del objeto subestelar utilizando la siguiente ecuación para movimiento circular:

$$v_p^2 = \frac{\mu}{a} \quad (4)$$

Donde  $\mu = GM_*$ . El valor de G en caso de trabajar en ua y años es  $4\pi^2$ .

Utilice esta ecuación para calcular el error en  $v_p$  vía propagación de errores.

- Conociendo ahora  $v_p$ ,  $M_*$  y  $v_*$ , utilice la ecuación (3) para estimar la masa mínima  $M_p$  del objeto subestelar.
- En la parte 2.c. usted estimó la masa mínima del objeto subestelar estimando la semiamplitud de la curva de velocidad radial de ambas estrellas. Vuelva a repetir el paso 2.c. pero utilizando ahora la verdadera semiamplitud Doppler de cada estrella del cuadro 2.

<b>16 CyB</b>	<b>47 UMa</b>
1.0	1.1

**Cuadro 1:** Masas estelares (en masas solares)

<b>16 CyB</b>	<b>47 UMa</b>
44	46

**Cuadro 2:** Semiaplitudes Doppler reales (en m/s).

### III).DISCUSIÓN

- I. Evalúe, de acuerdo a las masas halladas, si el compañero es un planeta. Para ello, tenga en cuenta que el límite en masa entre planeta gigante y estrella enana se establece como:

$$M_p \leq 13M_{Jupiter} \quad (5)$$

- II. ¿Qué otras condiciones cree que deberían satisfacer los compañeros subestelares para ser considerados planetas? **Nota:** Ver la propuesta para definir planetas tratada en la última Asamblea de la UAI (Agosto 2018).
- III. El método utilizado parte de la suposición de que la masa de la estrella es conocida. ¿Por qué método se podría conocer la masa de la estrella? ¿qué propiedades de la estrella se necesitaría conocer para poder estimarla?

## Anexo 1

Gráficos de velocidades radiales vs. Tiempo para 16 cyB y 47 UMa.

