

Práctica 2: Determinación de masas mediante curvas de velocidad radial

Objetivos

- 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.

Materiales

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

Procedimiento

Se estimarán las masas de dos objetos subestelares que orbitan en torno a las estrellas 16CygB 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.

Parte A: Determinación del periodo del objeto desconocido

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

1. Carga los datos de ambas curvas en Python (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. Grafica los datos de las curvas ajustadas. ¿Las órbitas de estas estrellas son circulares o elípticas? Esto se puede deducir estudiando visualmente las gráficas.
2. En cada curva, elige dos puntos característicos de la misma que permitan determinar el período (dos crestas o dos valles).
3. Identifica los dos puntos elegidos en la tabla de datos y calcula la diferencia de tiempos entre estos dos puntos para obtener una medida del período.
4. Repita este procedimiento 5 veces y calcule el valor promedio de las medidas para obtener una estimación del período T (en años) de estas dos estrellas.
5. Calcula, a partir de la tercera ley de Kepler y de los períodos medidos, el semieje mayor a de la órbita (ecuación 2).

$$T^2 = ka^3 \quad (2)$$

Si T 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 CygB y 47 UMa, las masas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Masas estelares (en masas solares).

16 CygB	47 UMa
1.0	1.1

Parte B: 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. Al no conocer la inclinación del sistema, la masa calculada corresponderá a la masa mínima posible. Para estimarla, aplica la ecuación del baricentro (centro de masas) del sistema. Si consideramos al baricentro como origen del sistema de referencia, se cumple la ecuación 3, 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, respectivamente.

$$0 = M_p x_p + M_* x_* \quad (3)$$

Si derivamos la ecuación 3 respecto del tiempo, obtenemos la ecuación 4, donde v_p es la velocidad del objeto subestelar, y v_* es la velocidad de la estrella.

$$0 = M_p v_p + M_* v_* \quad (4)$$

1. Estima la semiamplitud de la curva de velocidad radial de ambas estrellas y toma esta semiamplitud como estimación de la velocidad de la estrella respecto del baricentro del sistema. Nota 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?
2. Estima el error en la velocidad radial de la estrella v_* y en el período T midiendo la dispersión de las medidas de la velocidad radial y período 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:
 - a) Para estimar el error en el período T , toma las 5 medidas del período que se obtuvieron y calcula su desviación estándar.
 - b) Para estimar el error en la velocidad radial de la estrella v_* , primero obtén una función que corresponda a la interpolación de los datos de las curvas ajustadas (no de las medidas).
 - c) Usa esta función para calcular los errores en las medidas como las diferencias entre las medidas y el ajuste; luego obtén el valor promedio de estos errores.
3. A partir de los semiejes obtenidos en la Parte A y de la masa de la estrella, calcula la velocidad del compañero oscuro utilizando la ecuación 5 (movimiento circular), donde $\mu = GM_*$. El valor de G en caso de trabajar en ua y años es $4\pi^2$.

$$v_p^2 = \frac{\mu}{a} \quad (5)$$

4. Conociendo ahora v_p , M_* y v_* , utiliza la ecuación 4 para estimar la masa mínima M_p del objeto subestelar.
5. Calcula el error de M_p a partir de los errores estimados de v_* y T , para esto:
 - a) Propaga el error del período al semieje.
 - b) Propaga los errores del semieje a la velocidad del compañero oscuro.
 - c) Propaga los errores de las velocidades a la masa M_p .

6. En la parte B.4. se estimó la masa mínima del objeto subestelar, estimando primero la semiamplitud de la curva de velocidad radial de ambas estrellas. Repite el paso B.4. pero utilizando ahora la verdadera semiamplitud Doppler de cada estrella de la tabla 2.

Tabla 2: Semiamplitudes Doppler reales (en m/s).

16 CygB	47 UMa
44	46

Discusión

1. Evalúa, de acuerdo a las masas halladas, si el compañero es un planeta. Para ello, ten en cuenta que el límite en masa entre planeta gigante y estrella enana se establece como: $M_p \leq 13M_{Jupiter}$
2. ¿Qué otras condiciones crees que deberían satisfacer los compañeros subestelares para ser considerados planetas? **Nota:** Ver la propuesta para definir planetas tratada en la Asamblea de la IAU de Agosto 2018.
3. 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 Práctico 2

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

