

Práctica 5: Materia Oscura en el halo galáctico

Objetivos

- Determinar la relación entre materia oscura y materia visible para la galaxia NGC 2742.
- Discutir los posibles candidatos a materia oscura.

Conceptos clave

Materia y energía oscura. Curva de rotación. Elipticidad, inclinación y achatamiento intrínseco de una galaxia. Luminosidad integrada de galaxias. Velocidad tangencial y radial de estrellas.

Materiales

Curva de rotación de NGC 2742 (Figura 1), disponible en EVA.

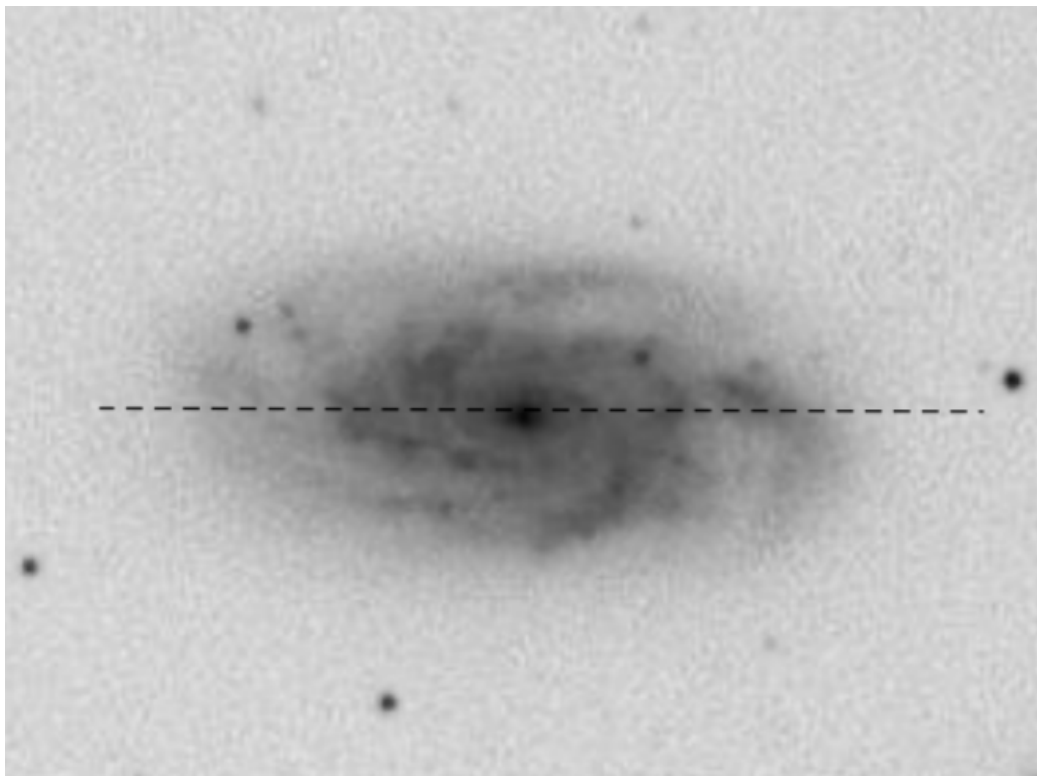


Figura 1: Imagen de la galaxia espiral NGC 2742. La línea negra a trazos indica la zona en la que se hicieron las medidas de la curva de rotación presentadas en la Figura 2.

Procedimiento

Se estimará la masa de la galaxia espiral NGC 2742 por dos métodos diferentes: uno basado en la curva de rotación (método gravitacional), y otro basado en la luminosidad. Se compararán ambas estimaciones a fin de encontrar diferencias que permitan estudiar la posible existencia de materia oscura en su halo.

Parte A: Estimación de la masa gravitacional de la galaxia en base a su curva de rotación

1. El archivo `ngc2742.csv` (disponible en EVA) contiene los datos de la curva de rotación, esto es, las medidas de las velocidades radiales de las estrellas (en km/s) en función de la distancia angular α al centro galáctico (en segundos de arco). Sabiendo que la distancia a la que está la galaxia de la Tierra es $d = 19.8 \pm 0.6$ Mpc, determina las distancias lineales R (en kpc) para los datos angulares contenidos en el archivo. **Nota:** para los cálculos deben convertirse los ángulos de arcosegundos a radianes ($1 \text{ rad} = 206265''$).
2. Dividiendo los datos en bins de R de 0.5 kpc, calcula los valores medios de las velocidades y su desviación estándar (que tomaremos como medida del error en la velocidad) en cada bin de R . Además, calcula en cada bin el valor medio de R . Registra los valores obtenidos en la Tabla 1.
3. Calcula la *velocidad tangencial* v a partir de la velocidad radial. Considera que la inclinación de la galaxia es de $i = 41.05^\circ \pm 0.02^\circ$. Teniendo en cuenta que la velocidad tangencial se mide sobre el plano galáctico, cuya normal está inclinada respecto a la visual en un ángulo igual a la inclinación i , la relación entre ambas velocidades estará dada por la Ecuación 1.

$$v = \frac{v_r}{\sin i} \quad (1)$$

4. Reporta las velocidades obtenidas **con sus errores correspondientes** en la Tabla 1.
5. Para cada valor de R , calcula la masa gravitatoria M_G encerrada por el radio R , a partir de las velocidades de las estrellas en la galaxia que registraste en la Tabla 1. Para ello, utiliza la Ecuación 2, obtenida aplicando la ley de gravitación universal de Newton y la segunda ley de la dinámica de Newton.

$$M_G = \frac{v^2 R}{G} \quad (2)$$

6. Reporta los valores hallados de M_G en la Tabla 1, **con su error correspondiente**. Considera que el error de la constante de gravitación universal es despreciable. Toma como error del radio R la mitad del rango utilizado para definir el subconjunto dentro del cual se calculó la velocidad radial.

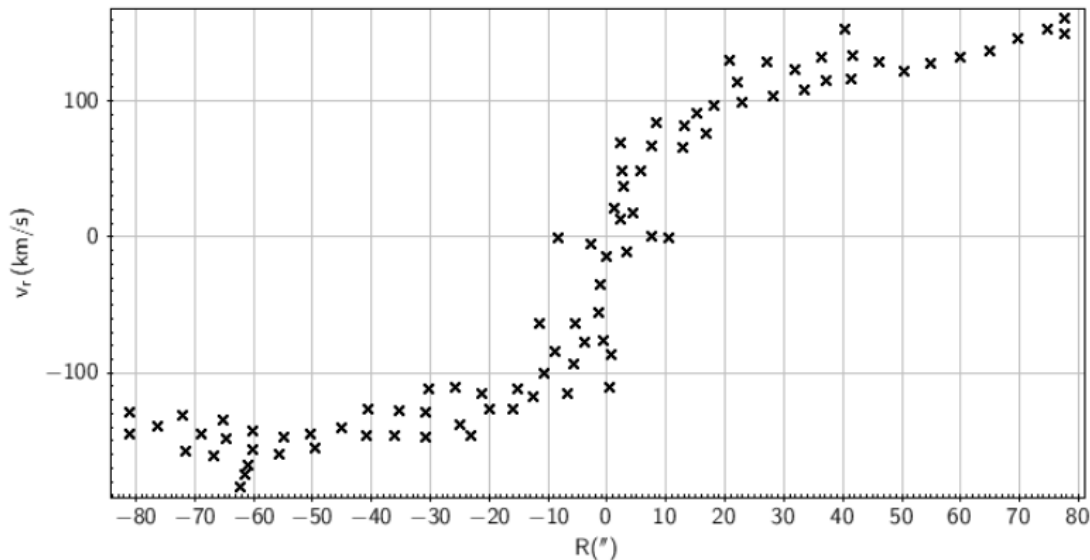


Figura 2: Curva de rotación de NGC 2742. En el gráfico se muestra la velocidad radial (componente de la velocidad en la dirección de la visual) en función de la distancia al centro galáctico (segundos de arco). Se puede ver que un lado se mueve con velocidad positiva (se aleja de nosotros) y otro con velocidad negativa (se acerca a nosotros), debido a la rotación del disco en torno al centro galáctico. Las velocidades radiales se obtienen a partir del análisis del espectro de la galaxia, donde las líneas espectrales aparecen desplazadas hacia el rojo (para la rama que se aleja de nosotros) o hacia el azul (para la rama que se acerca), debido al **efecto Doppler**.

Parte B: Estimación de la masa luminosa de la galaxia en base a su perfil de brillo

Para una galaxia espiral, la intensidad de la radiación versus el radio R al centro galáctico o *perfil de brillo superficial* se puede aproximar por la ley exponencial dada en la Ecuación 3, donde R es la distancia al centro galáctico (como antes), I_0 la intensidad en el centro galáctico ($R = 0$) y h la distancia a la cual la intensidad decae por un factor e^{-1} respecto al valor central, también conocida como *escala radial*.

$$I(R) = I_0 e^{-\frac{R}{h}} \quad (3)$$

La *luminosidad integrada* $L(R)$ al interior de R se obtiene integrando $I(R)$ en toda la superficie del disco de radio R (Ecuación 4).

$$L(< R) = \int \int I dS = \int_0^{2\pi} \int_0^R I(R') R' dR' d\theta = 2\pi I_0 h^2 \left[1 - \left(1 + \frac{R}{h} \right) e^{-R/h} \right] \quad (4)$$

Para la galaxia NGC 2742 los valores medidos de la escala radial e intensidad central son: $h = 3.8$ kpc, $I_0 = 6.725 \times 10^7 \text{ L}_{\text{sol}} \text{ kpc}^{-2}$.

1. Calcula la luminosidad total L al interior de cada radio R y registra los valores obtenidos en la Tabla 1.
2. Grafica la luminosidad total de la galaxia en función de la distancia al centro (R), dada por la Ecuación 4.

Para convertir el estimado de la luminosidad en un estimado de la Masa estelar correspondiente es necesario conocer el *cociente (o razón) Masa-Luminosidad* M/L de la población estelar. Este cociente está dado por la masa total de la población entre su luminosidad total. Como la luminosidad estelar no depende linealmente de la masa estelar, y además hay un número diferente de estrellas de diferentes masas (con las estrellas menos masivas siendo mucho más numerosas que las más masivas), esta cantidad no tiene una expresión analítica simple. En general, las estrellas menos masivas contribuyen la mayor parte de la masa de una galaxia, mientras que las más masivas, siendo mucho más luminosas, dominan su luminosidad.

Por esta razón, el cociente masa-luminosidad depende fuertemente de la edad de la población, ya que el tiempo de vida de las estrellas depende fuertemente de su masa. En general, la razón M/L va desde valores ~ 0.001 para las poblaciones más azules, cuya luminosidad está dominada por estrellas más masivas vivas en la secuencia principal, hasta valores máximos de ~ 2 para poblaciones más evolucionadas, comparativamente más rojas, en las que las estrellas masivas y azules de la secuencia principal ya han fallecido y cuya luminosidad es dominada por las gigantes rojas vivas. Los modelos de síntesis de poblaciones estelares permiten predecir cuál es la dependencia del cociente M/L de una población dado su color integrado, una cantidad directamente observable y medible para una galaxia. La Figura 3 ilustra cómo es esta dependencia de M/L con el color $B - V$ de una población.

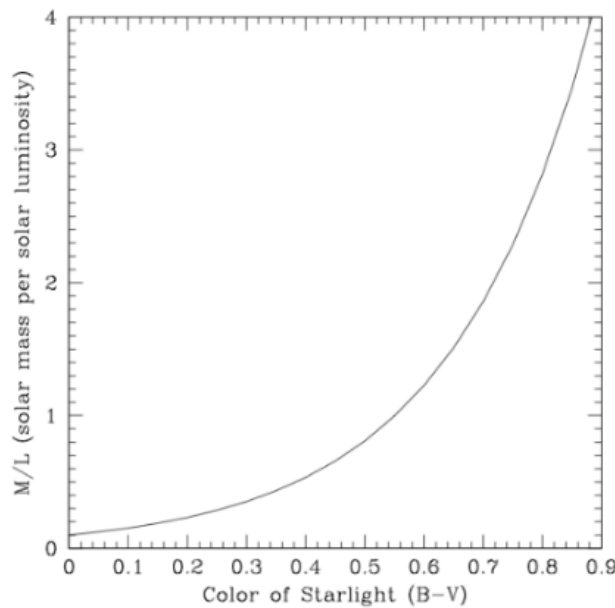


Figura 3: Cociente M/L de una población estelar, como función del color $B - V$.

3. Para NGC 2742, considera un cociente masa luminosidad $M/L = 2M_{\odot}/L_{\odot}$ máximo para toda la galaxia. Usando este valor, convierte tus medidas de luminosidad a masa luminosa M_L .

Parte C: Masa Total vs. Masa Luminosa

1. Realiza una gráfica superpuesta de la masa total o gravitacional M_G (calculada en la parte 2, por el método gravitacional) y la masa luminosa M_L en función de la distancia al centro (R). Utiliza leyendas para identificar cada curva.
2. Determina la razón M_G/M_L entre masa total y masa visible a la mayor distancia al centro. ¿Qué esperarías obtener si toda la masa correspondiera a la masa estelar?

R (kpc)	V_r (km/s)	V (km/s)	M_G ($M_{\odot}$)	L ($L_{\odot}$)	M_L ($M_{\odot}$)	M_G/M_L

Tabla 1: Resumen de resultados.

Discusión

1. De acuerdo al cociente entre masa total y masa luminosa calculado, ¿cuál sería la fracción de *materia oscura* en la galaxia?
2. Discute posibles candidatos para explicar la materia oscura del halo galáctico.
3. En la parte B3, se supuso un valor máximo de $2M_{\odot}/L_{\odot}$ para el cociente M/L de la galaxia. En general, el disco alberga la población más joven de la galaxia y tiene un color en promedio más azul, mientras que las poblaciones de halo y bulbo, dominadas por población vieja, son las más rojas de la galaxia. Usando la Figura 3 como guía, discute cómo se verían afectadas tus estimaciones de la masa luminosa y el cociente masa total a masa luminosa si tomara un valor de M/L menor que el supuesto. ¿Cómo afectaría tu inferencia sobre la presencia de materia oscura?

4. ¿Se pueden aplicar las técnicas anteriores a las galaxias de la Figura 4? Justifica.

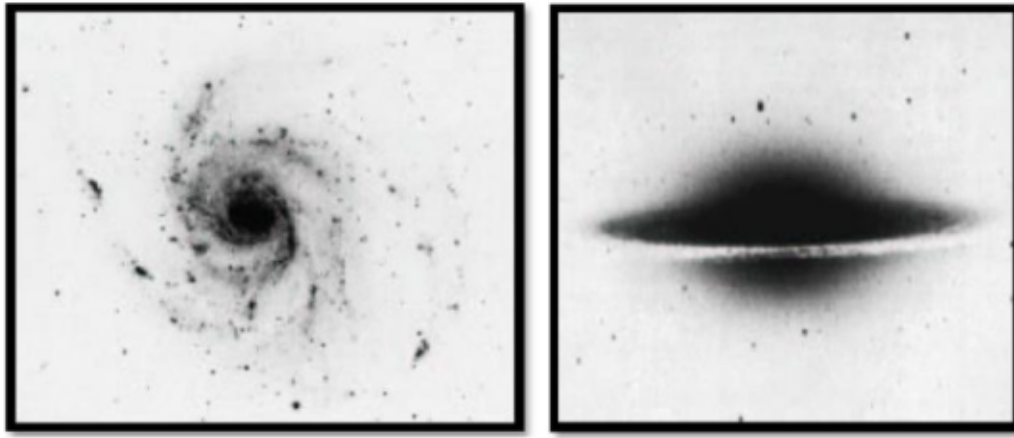


Figura 4: Izquierda: M101 (galaxia del Molinete). Derecha: M104 (galaxia del Sombrero)