

## PRÁCTICA 3

### Materia Oscura en el halo galáctico

#### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

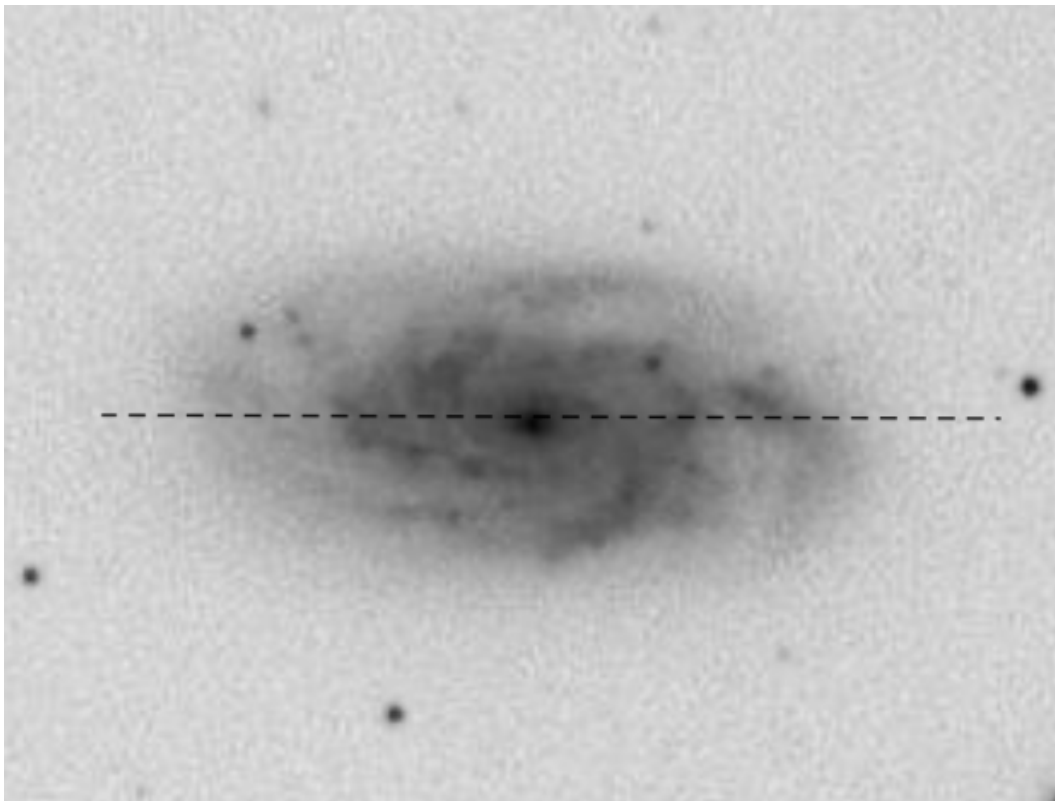
- Determinar la relación entre materia oscura y materia visible para la galaxia NGC 2742.
- Discutir los posibles candidatos a materia oscura.

#### CONCEPTOS CLAVE:

Materia y Energía Oscura. Curva de rotación. Elipticidad, inclinación y achatamiento intrínseco de una galaxia. Luminosidad integrada de galaxias. Velocidades tangencial y radial de estrellas.

#### I) MATERIALES

- Curva de rotación de NGC 2742 (disponible en EVA)



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

## II) 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.

### 1) 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  $\alpha$  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, determine las distancias lineales  $R$  (en kpc) para las distancias angulares indicadas en la Tabla 1. Anote todos los resultados en dicho cuadro. *Nota:* para los cálculos deben convertirse los ángulos de arcosegundos a radianes ( $1 \text{ rad} = 206265''$ ).
2. Para cada valor de la distancia radial  $R$ , tome el valor medio de las medidas de velocidad radial y la desviación estándar. Para esto, siga el siguiente procedimiento:
  - a. Realice una división de los datos de la curva de rotación en subconjuntos con Topcat definidos para intervalos de 0.5 kpc en  $R$ .
  - b. Para cada subconjunto creado, utilice la opción de valores estadísticos (ícono con el símbolo  $\Sigma$ ) para obtener el valor medio y la desviación estándar de las medidas de velocidad radial.
  - c. Registre sus primeras 10 medidas en la Tabla 1.
  - d. Grafique sus medidas de los valores medios de las velocidades radiales como función de la distancia (en kpc) incluyendo las barras de error, tomando la desviación estándar como estimado del error de cada medida.
  - e. Obtenga las velocidades radiales en km/s.
3. Calcule la *velocidad tangencial*  $v$  a partir de la velocidad radial. Suponga 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:

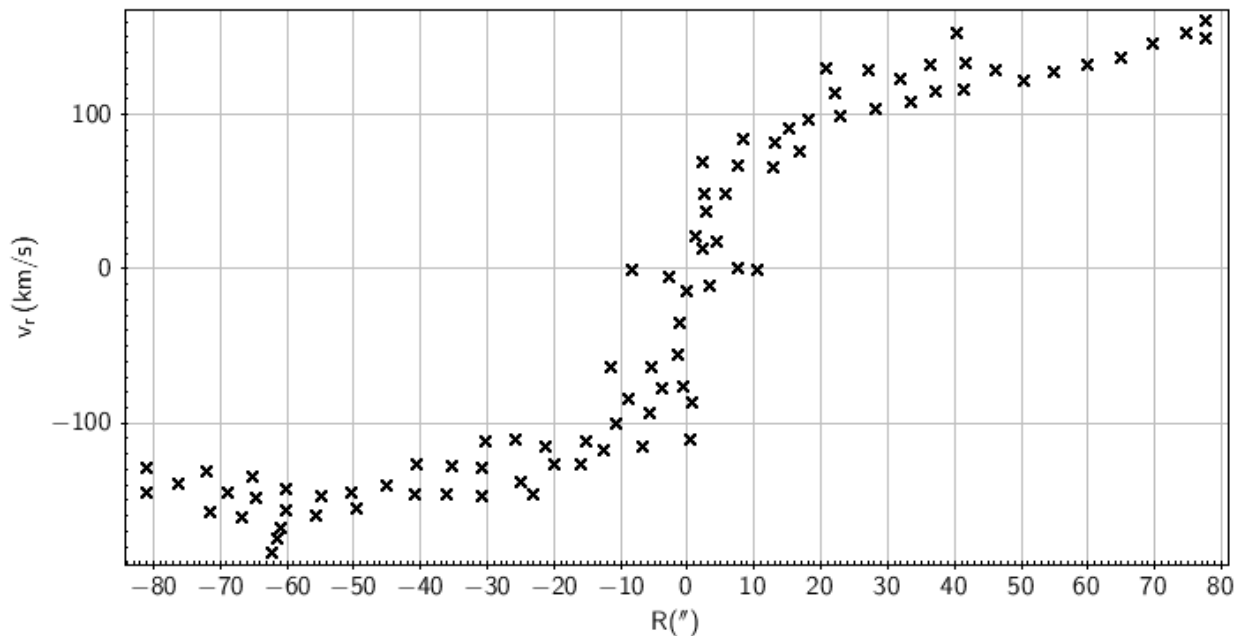
$$v = \frac{v_r}{\sin i}$$

Reporte la velocidad obtenida con su error correspondiente en la Tabla 1.

VI. Para cada valor de R, calcule la masa gravitatoria  $M_G$  encerrada por el radio R, a partir de las velocidades de las estrellas en la galaxia que registró en la Tabla 1. Para ello, utiliza la siguiente relación, obtenida aplicando la ley de gravitación universal de Newton y la segunda ley de la dinámica de Newton:

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

Reporte los valores hallados de  $M_G$  en la Tabla 1, con su error correspondiente. Suponga que el error de la constante de gravitación universal es despreciable. Tome como error del radio R la mitad del rango utilizado para definir el subconjunto dentro del cual 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 a nosotros) o hacia el azul (para la rama que se acerca), debido al *efecto Doppler*.

## 2) 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 siguiente ley exponencial:

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

siendo  $R$  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*.

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

$$L(< R) = \iint I dS = \int_0^{2\pi} \int_0^R I(R') R' dR' d\theta$$

$$L(< R) = 2\pi I_0 h^2 \left[ 1 - \left( 1 + \frac{R}{h} \right) e^{-\frac{R}{h}} \right]$$

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

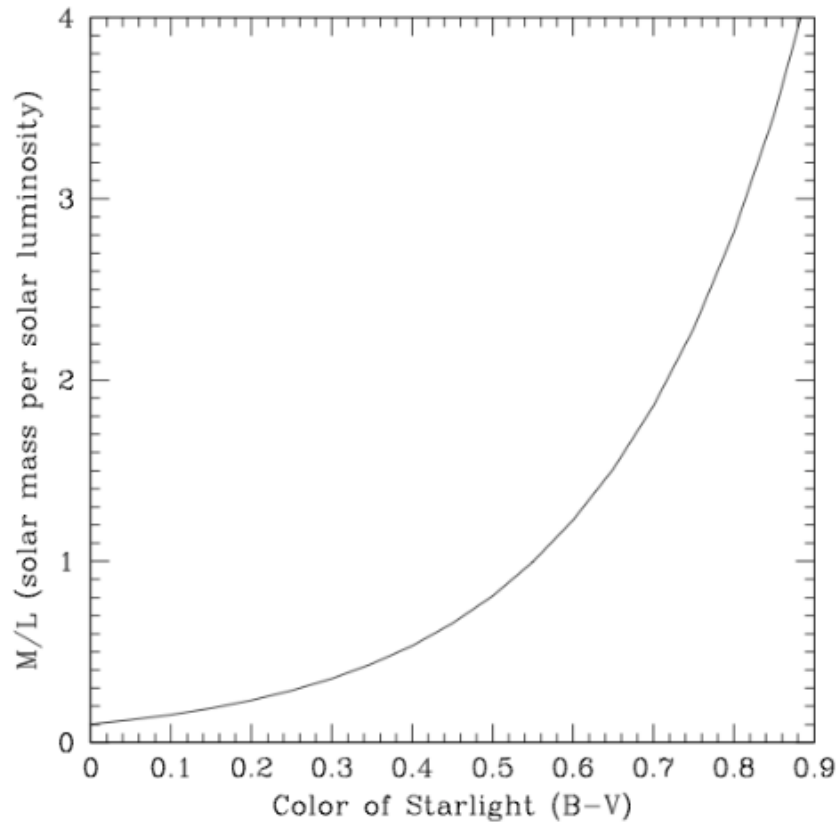
- I. Grafique la luminosidad total de la galaxia en función de la distancia al centro ( $R$ ), dada por la expresión anterior. Complete la Tabla 1 con la luminosidad total  $L$  al interior de cada radio  $R$ .

### 3) Masa Total vs. Masa Luminosa

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 masa (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 menos 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  $\sim 0.1$  para las poblaciones más azules, cuya luminosidad está dominada por estrellas más masivas vivas en la secuencia principal, hasta valores máximos de  $\sim 2$  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

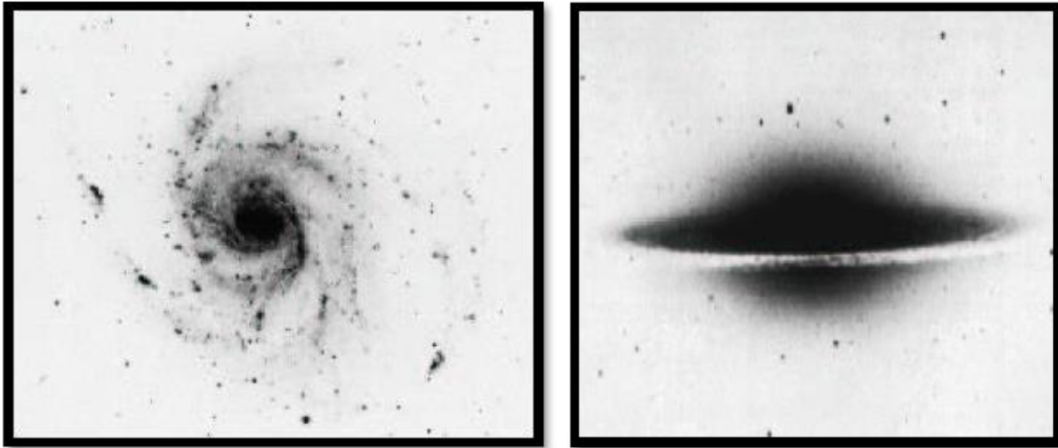
es la dependencia del cociente M/L de una población dado su color integrado, una cantidad directamente observable y medible para una galaxia. La Figura 3 ilustra cómo es esta dependencia de M/L con el color B-V de una población.



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

- I. Para NGC 2742, suponga un cociente masa luminosidad  $M/L = 2 M/L$ . máximo para toda la galaxia. Usando este valor, convierta sus medidas de luminosidad a masa luminosa  $M_L$ .
- II. Superponga en un mismo gráfico 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). Utilice leyendas para identificar cada curva.
- III. Determine la razón *Masa Total/Masa Luminosa* entre masa total y masa visible *a la mayor distancia* al centro. ¿Qué esperaríamos obtener usted si toda la masa correspondiera a la masa estelar?





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