



## Descripción Escenario Educativo Discover the COSMOS

### 2.9 Cómo pesar una galaxia

**Nombre de la Institución:** Instituto Astrofísico de Paris

**Título de la plantilla del escenario educativo:** Escenario KLiC

**Título del escenario educativo:** Cómo pesar una galaxia

**Versión:** 1.0

#### Tema

Los ejercicios consisten en medir la masa de una galaxia espiral, vista de perfil, utilizando el mismo procedimiento utilizado por los astrónomos. Es sorprendente cómo con sólo unas cuantas mediciones y el conocimiento de algunas leyes fundamentales de la física sea posible “pesar” los objetos más grandes y distantes del Universo, a pesar de la imposibilidad de llevar a cabo mediciones directas y del hecho de que la única información que disponemos procede de unos pocos fotones que han viajado durante decenas y decenas de millones de años. Lo que es aún más sorprendente es el

hecho de que la simple medición aquí propuesta hace que sea posible obtener evidencia experimental de la existencia de la famosa materia oscura. Se cree que la materia oscura y la energía oscura constituyen hasta 96% del contenido total del universo, pero son muy difíciles de detectar y de estudiar salvo a través de las fuerzas gravitacionales que ejercen. La investigación de la naturaleza de la materia oscura y de la energía oscura es uno de los mayores retos de hoy en los campos de la física de partículas y la cosmología. Los experimentos ATLAS y CMS buscarán partículas supersimétricas para poner a prueba una hipótesis probable de la composición de la materia oscura.

#### Edad del estudiante

17-18 años y universitarios.

#### Contenido científico

- conocimientos científicos necesarios para el profesor
  - Observación de una galaxia, continuo y líneas de emisión.

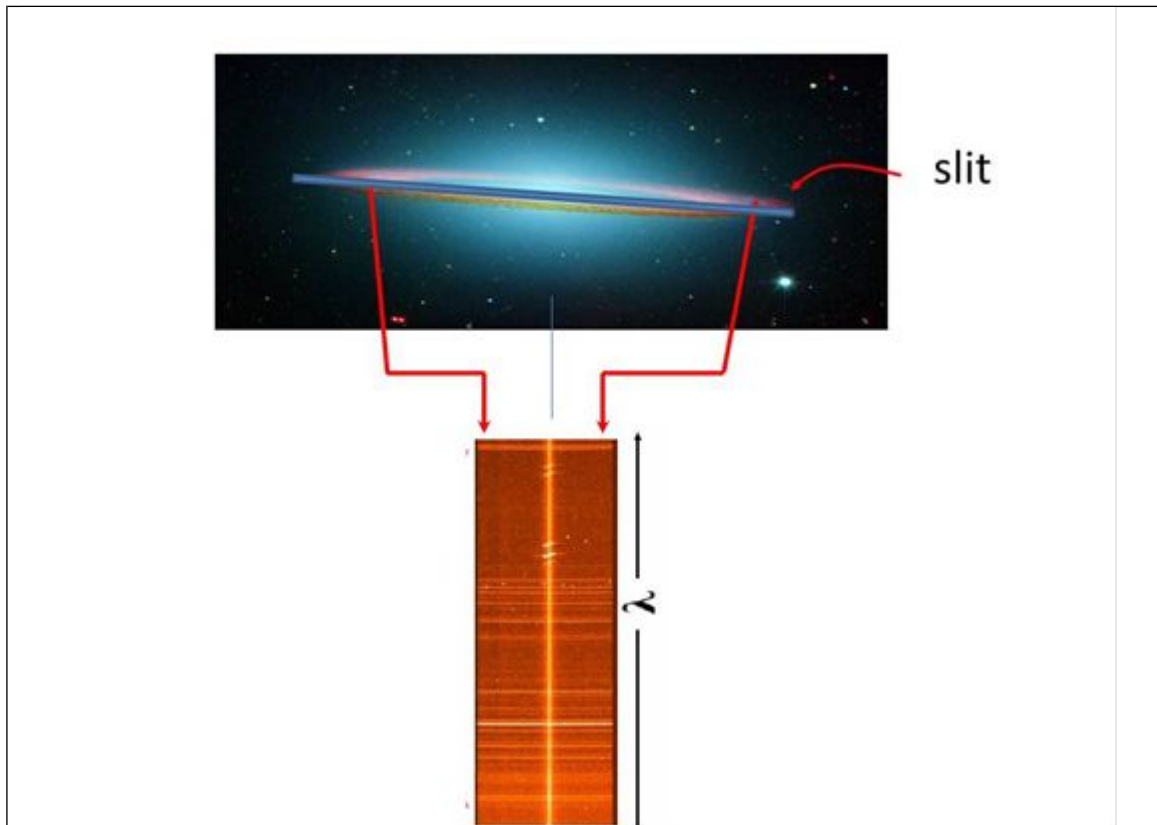
Pueden darse dos situaciones extremas cuando se observa una galaxia: de perfil (figura de la izquierda a continuación, la Galaxia del Sombrero) o de cara (figura de la derecha abajo, NGC1232).



## Descripción Escenario Educativo Discover the COSMOS



En el caso que consideramos aquí, la galaxia estará de perfil, y se observa la luz a lo largo de la rendija del espectrógrafo que pasa por el centro de la galaxia (ver imagen debajo).



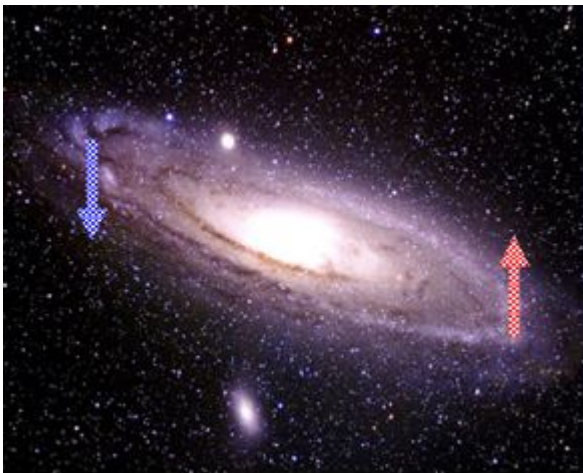
En cada posición a lo largo de la rendija, la radiación emitida por la materia presente en la galaxia se recibe en la Tierra y pasa a través de un elemento dispersante (prisma, red de dispersión, etc.) que separa las longitudes de onda. De esta manera, se obtiene una imagen que, a lo largo del eje  $x$  (dirección vertical en la figura de arriba), que contiene el espectro, es decir, una función que representa la energía recibida por longitud de onda,  $\lambda$ , de la radiación. En la imagen del espectro, la línea vertical en el centro representa la emisión desde el centro del segmento, es decir, desde el



## Descripción Escenario Educativo Discover the COSMOS

núcleo de la galaxia, que claramente, no sólo emite en líneas espectrales a una longitud de onda concreta  $\lambda$  sino que produce un continuo en toda las  $\lambda$ 's registrables. *En la imagen que se va a descargar, las longitudes de onda están en dirección horizontal, y la posición a lo largo de la rendija en dirección vertical.*

### ➤ Efecto Doppler-Fizeau



Las galaxias espirales contienen una gran cantidad de gas; el gas emite un espectro de líneas, si la galaxia es vista con una cierta inclinación (y no directamente de cara o de canto), y dado que rota sobre su propio eje, en un lado el gas se aleja de nosotros y en el otro lado, con respecto al centro, se aproxima a nosotros (véase la figura). Las líneas emitidas por el gas que se mueve con respecto al observador sufren el llamado efecto Doppler, que desplaza la frecuencia observada (o longitud de onda).

La medición que haremos se basa en el hecho de que el desplazamiento Doppler es proporcional a la velocidad a la que el gas se aleja o se acerca a nosotros. Esta velocidad radial es directamente medible en el espectro. Por lo tanto, obtenemos la velocidad  $v$  del gas como una función de su distancia  $r$  desde el centro de la galaxia. El diagrama de la velocidad  $v$  de cada punto de la galaxia como una función de la distancia  $r$  se conoce como curva de rotación. Más allá de una distancia dada, donde la materia ya no es parte del cuerpo rígido compuesto por el núcleo de la galaxia, la velocidad es a su vez proporcional a la masa circundada por el radio  $r$ , como se describe en las leyes de Kepler.

### ➤ Materia Oscura

Al estudiar galaxias (como se hace en este escenario) se encuentra invariablemente que la velocidad de rotación se mantiene constante, o "plana", al aumentar la distancia del centro galáctico. Este resultado es muy intuitivo ya que, basándose en la ley de Newton de la gravedad, la velocidad de rotación se reduciría constantemente para la materia más lejana del centro galáctico. Análogamente, los planetas interiores del Sistema Solar viajan más rápidamente alrededor del Sol de lo que lo hacen los planetas exteriores (por ejemplo, la Tierra viaja alrededor del Sol a unos 100.000 km / h mientras Saturno, que está más lejos, viaja a sólo un tercio de la velocidad; esta es la rotación kepleriana). Una forma de acelerar la materia exterior dentro de una galaxia sería añadir más masa en el halo de esta galaxia. Esta masa extra no se ve directamente en las imágenes. Así, las curvas planas de rotación galáctica parecen sugerir que cada galaxia está



## Descripción Escenario Educativo Discover the COSMOS

rodeada por cantidades significativas de materia oscura. Se ha postulado, y generalmente se acepta que la materia oscura debería estar ubicada en un halo masivo, más o menos esférico que envuelve cada galaxia.

La existencia de la materia oscura y la búsqueda de las partículas correspondientes a este tipo de materia es todavía un tema controvertido. Se pueden encontrar más detalles en las páginas pedagógicas escrita por el profesor de física en Berkeley, M.

White: (<http://astro.berkeley.edu/~mwhite/welcome.html> - intereses actuales de investigación).

- Pre-requisitos de conocimientos para el estudiante: sólo Leyes de Newton (la relación necesaria entre la masa y la velocidad puede ser proporcionada por el profesor).

### Los objetivos de aprendizaje

La actividad educativa que se propone es importante porque favorece de forma creativa los conocimientos sobre los conceptos de: movimiento, aceleración, luz, y, además, ofrece a los alumnos la oportunidad de poner a prueba su hipótesis científica propia y también para poner a prueba la aplicabilidad de estas hipótesis en los nuevos contextos de aprendizaje.

Al final de la actividad los alumnos serán capaces de mejorar y desarrollar las competencias de:

- Comunicación y relación interpersonal
- Variables de identificación
- Construir una tabla de datos y un gráfico
- Formulación de hipótesis y elaboración de estrategias de experimentación para estas hipótesis

### Pensamiento investigador

- Los estudiantes explican las posibles soluciones
- El profesor proporciona nuevas definiciones y espera que los estudiantes las utilicen.
- Los estudiantes deducen relaciones nuevas y las aplican a los datos

### Tecnología aplicada

- Salsaj software
- Google Sky

### Guía para la discusión

#### 1. Descripción física de la galaxia NGC7083

- a) Utiliza Google Sky para localizar la galaxia
- b) Busca su distancia e inclinación



## Descripción Escenario Educativo Discover the COSMOS

Deberías hallar que esta galaxia está a una distancia de 39,7 Mpc a la Tierra (1 unidad =  $3,09 \cdot 10^{16}$  m) y está inclinada en 30 grados con respecto a la línea de visión desde la Tierra.



## Descripción Escenario Educativo Discover the COSMOS

2. ¿Cómo se relacionan la masa M de la galaxia y el espectro observado?

1. Discusión preliminar sobre la galaxia y el espectro.

- Diferentes tipos de galaxias
- Diferentes espectros y tipos de líneas
- Vínculo entre líneas y átomo: la **física nuclear** nos proporciona una determinación precisa de las líneas de emisión.

2. Determinar la relación entre la masa total de la galaxia M y la velocidad de un núcleo de masa m en rotación en una circunferencia de radio r alrededor del centro de la galaxia. En realidad, hay dos relaciones! Ya sea por un núcleo situado en la galaxia, actuando como un cuerpo rígido con una velocidad angular  $\omega$  :  $v = \omega r$  o por un núcleo de masa m, fuera de la galaxia y sujeto a la fuerza de gravedad de la galaxia.

- Se puede proporcionar la relación y hablar de ello o tratar de inferirla.
- Los estudiantes pueden discutir qué parámetros físicos deben estar involucrados en esta relación y, a continuación, utilizar las unidades para determinar los casos y las relaciones.
- La mayoría de los estudiantes deben ser capaces de deducir la primera relación.
- Los estudiantes avanzados pueden deducir la segunda relación,
  - asumir un radio constante
  - entonces, la energía potencial es constante
  - entonces, la energía cinética es constante, por lo que  $v = \text{Cte}$
  - en las coordenadas polares, con  $R = \text{cte}$  y  $v = \text{cte}$ ,

se deriva la aceleración:  $a = \frac{v^2}{r}$

v. las leyes de Newton dan la relación

$$\frac{GmM}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

3. Relación entre la longitud de onda observada de una línea (emitida por la galaxia a una distancia r) y la velocidad de rotación en torno al centro de la galaxia en este punto.

- Conexión con el sonido (sonido= onda)
- Generalización del efecto Doppler (se puede abrir la discusión sobre el flujo de Hubble del universo, que se observó por primera vez en el desplazamiento de las líneas de emisión de galaxias distantes).



## Descripción Escenario Educativo Discover the COSMOS

- c. **El profesor tiene que señalar aquí que la velocidad del núcleo según lo observado por nosotros puede ser cero si la galaxia se observó de frente ...**
- d. El ángulo entre la galaxia y la línea de visión modifica la proyección de la velocidad a lo largo de la línea de visión:

$$V_{longitudinal} = V_{rotation} \cos(2\pi - i) = V_{rotation} \sin(i)$$

Buscamos  $v = V_{rotation}$  y el efecto Doppler da

$$V_{longitudinal}$$

Finalmente, 
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v \sin(i)}{c}$$

### 3. Análisis de los datos: volver del espectro a la masa de la galaxia

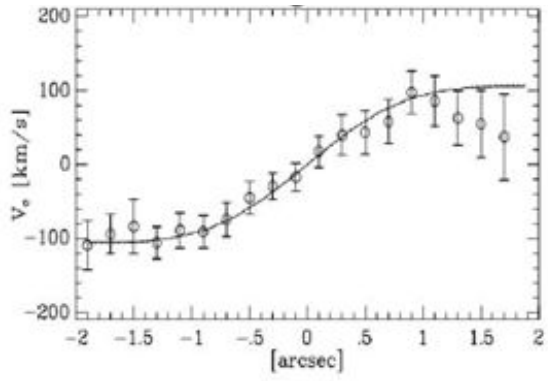
- a) Calibración de la imagen (los estudiantes deben darse cuenta de que se necesita esta calibración - por eso, puede realizar este paso después haber intentado el siguiente)
- I. Determinación de la correspondencia pixel horizontal <-> longitud de onda (usando el doblete del NII observado en la galaxia con  $\lambda_1 = 6616 \text{ \AA}$  y  $\lambda_2 = 6652 \text{ \AA}$ , se halla que 22 píxeles = 20  $\text{\AA}$ )
  - II. Determinación de la correspondencia píxel vertical <-> radio  
Números dados a los alumnos  
La galaxia está a una distancia = 39,7 Mpc (1pc = 3,09.  $10^{16}$  m)  
El tamaño angular de la imagen = 4 minutos de arco  
Relación que se deriva:  
1 pixel vertical = 0,82 segundos de arco (= dq)  
Esta información se da en Salsaj (Image → Show Info...)  
1 pixel vertical = R dq = 4,88.  $10^{18}$  m (con dq en radianes)
- b) Determinación de  $\Delta\lambda(r)$
- c) Determinación de  $v(r)$

### 4. Discusión

- a) ¿Este perfil es realista / consistente con sus expectativas / predicciones?  
Debe encontrarse un perfil simétrico.



## Descripción Escenario Educativo Discover the COSMOS

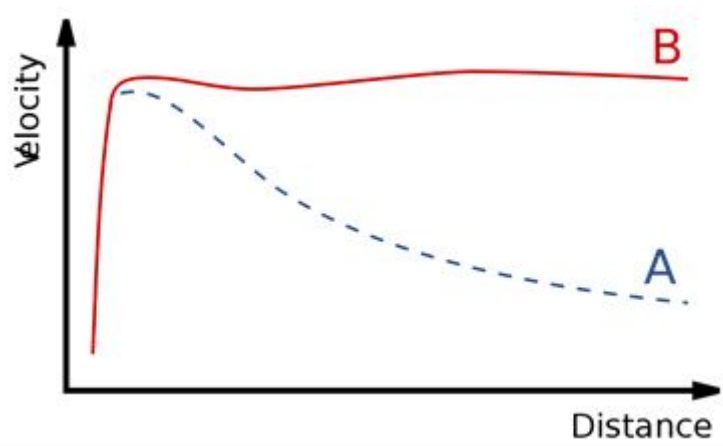






## Descripción Escenario Educativo Discover the COSMOS

Debajo, se comparan las curvas predichas (azul) y las observadas (rojo). Cerca del centro, la curva es consistente con un cuerpo rígido. Pero más allá, la predicción de la evolución de la velocidad fuera de la galaxia (por lo que para una masa constante  $M$ ) es  $\propto \frac{1}{\sqrt{r}}$ . Esto no es coherente con la curva observada.



b) ¿Puede derivarse la masa  $M$ ?

Mientras el núcleo es parte del cuerpo rígido, la velocidad no está vinculada a la masa, sino solamente a la velocidad de rotación de la galaxia como un todo.

Cuando la materia está fuera del cuerpo rígido y actúa como un planeta que orbita alrededor del Sol, la velocidad de rotación  $v^2 = GM/r$ , y se puede inferir la masa  $M(r)$ , que es la masa dentro de un radio  $r$ . Dado que nuestra curva muestra que la velocidad es constante con  $r$ , significa que la masa debe seguir aumentando proporcionalmente a  $r$ . **Esta masa no se considera materia luminosa.** Este aumento parece acabar a unos 50kpc (pero no lo vemos con los datos en la mano), donde el halo parece estar truncado. Los astrónomos infieren que la relación masa-luminosidad de la galaxia, incluyendo su halo, que es aproximadamente 5 veces mayor que el tamaño de la región interior luminosa.

En algún punto, el profesor introducirá el concepto de **materia oscura** ... Tenga en cuenta que esta noción es todavía teórica, ya que no hay partículas o cualesquiera ingredientes del modelo estándar de la física corresponden a esta materia oscura hasta ahora.

c) ¿Se puede deducir la masa ( $r$ )?

Podemos derivar la masa a una distancia donde el perfil ya no es consistente con un cuerpo rígido. Debería hallarse un **resultado típico** de  $10^{40}$  kg (en un radio  $r_0 = 10$  píxeles = 8 segundos de arco, y una velocidad  $v = 180$  km / s). Entonces, la masa (hasta unos pocos kpc) es:  $10^{40} \frac{r}{r_0}$  kg.

Para ir más lejos:

A. Estimaciones de las barras de error



## Descripción Escenario Educativo Discover the COSMOS

1. Estimar los errores en la calibración
  2. Cómo se traduce este error en longitud de onda, en velocidad, y finalmente en masa.
- B. Comparar con otras masas
1. Calcular la masa del Sol utilizando la rotación de la Tierra, o de otro planeta. No hay indicios de materia oscura dentro de la galaxia, y la curva de rotación de los planetas sigue las leyes de Kepler.
  2. Calcule la masa de la Tierra mediante la rotación de la Luna.
- C. Buscar información sobre los modelos de búsqueda de materia oscura y los test (experimentos del LHC, por ejemplo)

### Valoración



## Descripción Escenario Educativo Discover the COSMOS

### FICHA DE TRABAJO DEL ESTUDIANTE

#### Título de la unidad

¿Cómo pesar una galaxia?

#### Introducción

La actividad educativa consiste en medir la masa de una galaxia espiral, vista de perfil, utilizan el mismo procedimiento empleado por los astrónomos. Vas a utilizar sólo la imagen espectroscópica de la galaxia NGC7083 **qué se puede analizar con el software SalsaJ.**

#### **Debes aprender**

- **¿cómo leer una imagen espectroscópica?**
- **¿cómo interpretar los datos espectroscópicos en términos de cantidades físicas?**

#### Materiales

- Una imagen llamada NGC7083\_RID.FTS

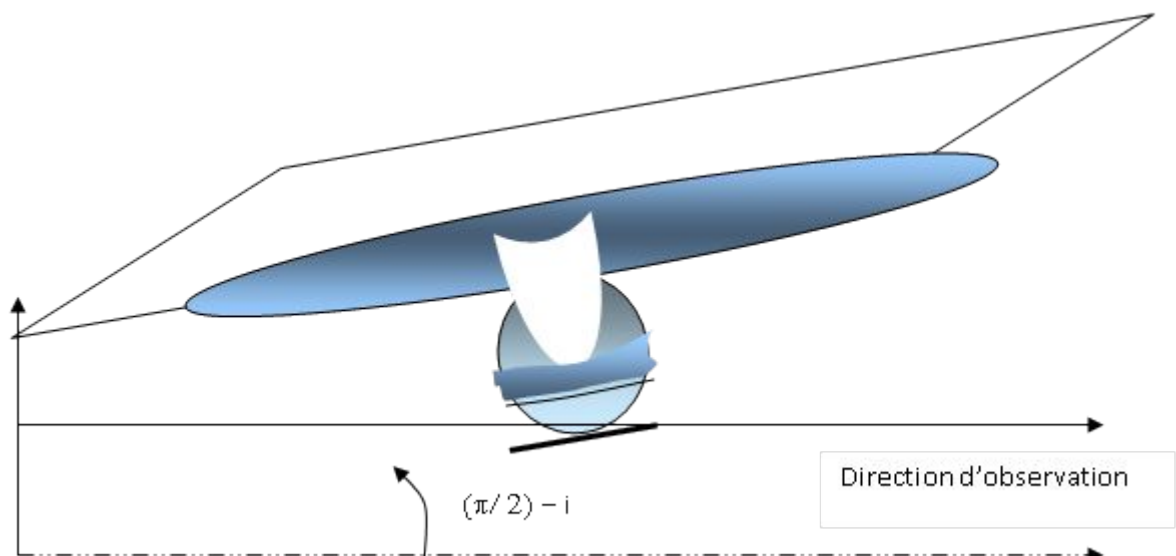
El tamaño de esta imagen es 386x294 píxeles.

El eje vertical corresponde a la línea que va a través de la galaxia. Las unidades relevantes son la separación angular entre los dos lados de la imagen,  $\Delta\theta=4$  minutos de arco.

El eje horizontal indica las longitudes de onda a las que se recibe en la Tierra la radiación proveniente de cada posición en la galaxia. La línea horizontal central corresponde al continuo emitido por el centro de la galaxia.

Las líneas verticales corresponden a las líneas de emisión específicas emitidas por la materia localizada en diferentes radios a lo largo de la galaxia.

- El software Salsa J.
- Características de la galaxia (puedes localizarla primero con Google Sky)





## Descripción Escenario Educativo Discover the COSMOS

- La distancia entre la Tierra y la galaxia es de  $R = 39,7 \text{ Mpc}$  (1 unidad =  $3,09 \cdot 10^{16} \text{ m}$ )
- El tamaño angular de la imagen = 4 minutos de arco
- La orientación angular de la galaxia es  $\sin(i) = 0,5$

### Investigación

#### Ficha de Observación

**Nombre y apellido de los participantes en el experimento:**

**Categoría:**  alumno;  estudiante profesor,  profesor

**Edad:** \_\_\_\_\_, **Sexo:**  M,  F

A. ¿Cómo se relacionan la masa  $M$  de la galaxia y la imagen observada?

**Hipótesis** - Discutir las diferentes magnitudes físicas que se pueden utilizar para describir la materia en la galaxia. Trate de describir cómo la masa de la galaxia podría estar relacionada con algunas de las propiedades de la luz que es emitida por la galaxia.

Deducir una o más relaciones entre la masa de la galaxia  $M$ , su velocidad de rotación  $\omega$  la masa  $m$  de un núcleo en rotación alrededor del centro de la galaxia con una velocidad  $v$ , y el radio de este círculo  $r$  (se pueden distinguir dos casos según la conexión física entre el núcleo y la galaxia).

Inferir una o más relaciones entre la velocidad  $v$  de un núcleo, y la longitud de onda de la luz que emite, que recibimos en la Tierra.

¿Cómo cambian esas relaciones si la galaxia forma un ángulo  $i$  con la línea de visión de la Tierra?



## Descripción Escenario Educativo Discover the COSMOS

### B. Análisis de los datos: volver del espectro a la masa de la galaxia

1. Determinación de  $v(r)$ . Explica cómo derivar el cambio en la longitud de onda como una función de la distancia al centro de la galaxia.

Haz una gráfica de  $\Delta\lambda(r)$ .

2. Determinación de  $v(r)$ . Explicar cómo se va a derivar la velocidad de rotación en función de la distancia al centro de la galaxia.

Haz una gráfica de  $v(r)$ .

### C. Discusión

1. ¿Es el perfil de la velocidad realista / consistente con sus expectativas / predicciones?
2. ¿Puede responder a la pregunta inicial y decir algo acerca de la masa?