

Observación y cálculo del porcentaje de materia oscura de galaxias de la base de datos SPARC.

Pablo L. Alazraki Salas¹

RESUMEN

Para el presente artículo se eligieron cuatro galaxias de la base de datos SPARC: NGC 55, NGC 891, NGC 2403 y NGC 5985. Además de presentar sus imágenes astronómicas, se calculó la cantidad de materia oscura que contiene cada una, encontrando que sus porcentajes de materia oscura con respecto a la materia total van desde el 79.7185% para NGC 891 hasta un 97.0921% para NGC 2403. En este estudio se muestra de dónde se derivaron las ecuaciones utilizadas para calcular la cantidad de materia oscura de una galaxia y se incluyen los valores de las constantes utilizadas. Se incluye el código en Python utilizado para obtener los resultados numéricos y la lista de procesos mediante los cuales se llegó a las imágenes astronómicas finales. Los resultados muestran que las curvas de rotación de las cuatro galaxias tienden a la misma forma, lo cual es coherente con la teoría sobre la materia oscura.

Palabras Clave: Cuerpos astronómicos: galaxias - Materia: materia oscura, materia ordinaria o bariónica, masa – Variables: luminosidad, velocidad observada, radio.

1. INTRODUCCIÓN

La observación astronómica ha sido indispensable para el desarrollo de la humanidad. En el pasado nos ayudó principalmente para conocer los cambios de las estaciones, para medir el tiempo y para navegar grandes distancias, lo cual nos permitió conocer nuestro planeta.

Con la llegada del radiotelescopio y de técnicas como la espectrometría y la fotometría, ahora somos capaces de calcular distancias a galaxias de una

manera bastante precisa y, además, somos capaces de medir sus velocidades de rotación y saber qué tan rápido se alejan o se aproximan hacia nuestra galaxia.

El doctor en física Fritz Swicky se encontraba estudiando un cúmulo de galaxias alrededor del año 1933, llamado *Abell 1656*, cuando realizó un descubrimiento que cambiaría cómo entendemos al universo. Obteniendo los espectros de emisión de las galaxias del cúmulo, calculó sus velocidades de

¹ Departamento Académico de Sistemas Digitales, Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM), Calle Río Hondo 1, Álvaro Obregón, Ciudad de México.

rotación a partir del Efecto Doppler cuando se percató de algo.

Al analizar las curvas de rotación, se dio cuenta de que la velocidad a la que estaban rotando las galaxias no correspondía con su cantidad de materia visible, ya que la fuerza gravitatoria causada por la masa observable de una galaxia no era suficiente para impedir que una galaxia se dispersara por rotar a esas velocidades.

Así, llegó a una conclusión: debía existir un tipo de materia no observable que proporcionara la suficiente fuerza gravitatoria para evitar que una galaxia se dispersara. A este tipo de materia le llamó *materia oscura* (L'astrònica de Sabadell, s.I).

Este descubrimiento creó una nueva rama de la astrofísica dedicada a estudiar la materia oscura y encontrar qué tan común es en el universo, llegando a que únicamente el 15% de la materia del universo corresponde a materia ordinaria, dejando el 85% para la materia oscura.

En este trabajo se utilizó SPARC (*Spitzer Photometry & Accurate Rotation Curves*), una base de datos que contiene la información y las curvas de rotación de 175 galaxias, tanto espirales como irregulares (Lelli, F. *et al*, 2016). A partir de estos datos se calcularon la cantidad y el porcentaje de materia oscura de 4 galaxias: NGC 55, NGC 891, NGC 2403 y NGC 5985 ².

Junto con los porcentajes de materia oscura y las curvas de rotación, se presentan imágenes procesadas en *PixInsight* de cada galaxia a partir de

archivos astronómicos. Para el caso de la galaxia NGC 55 se realizó la observación usando *ITelescope*, mientras que los archivos de las demás galaxias fueron recuperados en línea en la página de *Misti Mountain Observatory*.

2. OBTENCIÓN DE ARCHIVOS ASTRONÓMICOS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS

2.1 ITelescope

ITelescope ³ es una página de internet en la cual una persona puede rentar de manera remota un telescopio para realizar observaciones astronómicas. Los archivos FITS resultantes de la observación son posteriormente enviados para poder procesarlos.

Para la observación de la galaxia NGC 55 se utilizó el telescopio T71, ubicado en el desierto de Atacama, Chile. Se utilizaron 4 filtros: *Luminance*, *Red*, *Green* y *Blue*, cada uno con 5 subexposiciones de 60 segundos cada una, llegando a un tiempo de imagen de 5 minutos por cada filtro (20 minutos totales de imagen).

2.2 Misti Mountain Observatory

Misti Mountain Observatory es un observatorio ubicado al noroeste del desierto de Arizona hecho por Jim Misti. El observatorio cuenta con una página de internet ⁴ en la cual publican sus archivos astronómicos de galaxias, nebulosas y cúmulos de galaxias, así como cuántas subexposiciones se realizaron de cada filtro y su tiempo de duración.

Del observatorio Misti se obtuvieron los archivos astronómicos de las galaxias

² Los datos de SPARC están disponibles en: <http://astroweb.cwru.edu/SPARC/>

³ Sitio web de ITelescope: <https://www.itelescope.net/>.

⁴ Sitio web de Misti Mountain Observatory: http://mistisoftware.com/astrometry/index_fits.htm

NGC891, NGC 2403 y NGC5985. Cabe mencionar que el archivo que contiene a la galaxia NGC5985 también contiene a las galaxias NGC5981 y NGC5982.

2.3 PixInsight

PixInsight ⁵ es un software especializado para la creación de imágenes astronómicas; fue desarrollado por la

compañía española *Pleiades Astrophoto* y cuenta con técnicas y algoritmos tan avanzados que recientemente se ha convertido en el estándar para el campo de la astrofotografía.

Todas las imágenes presentadas en este artículo fueron procesadas con PixInsight y pasaron por los mismos procesos, los cuales se listan en el apéndice.

Tabla 1. Información sobre las observaciones de cada galaxia. La columna *Obtención* se refiere a dónde fueron obtenidos los archivos FITS. MMO se utiliza para abreviar *Misti Mountain Observatory*. En la columna *Filtro*, se abrevian los filtros utilizados: *Luminance*, *Red*, *Green* y *Blue* respectivamente.

Galaxia	Obtención	Filtro	Cantidad de subexposiciones	Tiempo total por exposición (min)	Tiempo total de integración (min)
NGC55	ITelescope	L	6	6	24
		R	6	6	
		G	6	6	
		B	6	6	
NGC891	MMO	L	19	95	185
		R	6	30	
		G	6	30	
		B	6	30	
NGC2403	MMO	L	15	75	150
		R	5	25	
		G	5	25	
		B	5	25	
NGC5985	MMO	L	10	50	95
		R	3	15	
		G	3	15	
		B	3	15	

3. CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE MATERIA OSCURA

3.1 Relación masa-luz

La razón masa-luz, conocida en inglés como *mass to light ratio*, es una proporción que nos ayuda a conocer qué

tanta materia oscura contiene un cuerpo astronómico.

La razón está dada por

$$\frac{M}{L} = \Upsilon \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}$$

, donde M y L son la masa y la luminosidad de un cuerpo astronómico dado y M_{\odot} y L_{\odot}

⁵ Sitio web de PixInsight: <https://pixinsight.com/>

representan la masa y la luminosidad del sol ⁶ respectivamente.

Cuando M es en su totalidad materia ordinaria, Y tiene valor de 1. Entre mayor cantidad de materia oscura tenga un cuerpo, mayor será el valor de Y ⁷.

Para poder encontrar la Y de una galaxia, primero es necesario encontrar su materia total a partir del cálculo de la masa dinámica.

3.2 Cálculo de la cantidad de materia oscura

3.2.1 Cálculo de la masa dinámica

Empezaremos con 3 ecuaciones:

(1) $F = m \cdot a$ [kg] ... Segunda Ley de Newton.

(2) $a = \frac{v^2}{r} \left[\frac{m}{s^2} \right]$... Aceleración centrípeta en un movimiento circular.

(3) $F = G \frac{m \cdot M}{r^2}$ [N] ... Ley de Gravitación Universal.

Sustituimos (2) en (1) y obtenemos

$$F = \frac{m \cdot v^2}{r} [N] \dots (4)$$

, donde m es la masa de un cuerpo ubicado a un radio r del centro de la galaxia con una velocidad tangencial v .

Ahora igualamos (3) y (4):

$$G \frac{m \cdot M}{r^2} = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

Simplificando y despejando M , obtenemos

$$M(r) = \frac{v^2 \cdot r}{G} [kg]$$

, donde M es la masa dinámica en función del radio a partir de la velocidad tangencial observada.

Para un objeto que esté en el radio más alejado al centro de la galaxia, r_{max} , $M(r_{max})$ representa la cantidad de materia total (M_T) que debe tener la galaxia para que la velocidad tangencial sea congruente con la ley de la gravitación universal, permitiendo que un cuerpo esté atado gravitacionalmente a la galaxia ⁸.

Para efectos de este trabajo, se consideró la masa total M_T en términos de masas solares, es decir:

$$\frac{M_T}{M_{\odot}} = \frac{M(r_{max})}{M_{\odot}} \dots (5)$$

Esta masa incluirá tanto materia bariónica (M_b) como materia oscura (M_{dm}).

3.2.2 Obtención de Y

Partimos de la relación masa-luz:

$$\frac{M_T}{L} = Y \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}} \dots (6)$$

Despejando Y de (6), obtenemos la siguiente ecuación:

$$Y = \left(\frac{M_T}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{L_{\odot}}{L} \right)$$

, donde Y , como vimos anteriormente, representa la proporción de materia oscura que posee un cuerpo con masa total M_T y luminosidad L .

⁶ $M_{\odot} = 1.898 \times 10^{30} \text{ kg}$, $L_{\odot} = 3.829 \times 10^{26} \text{ W}$

⁷ Por definición, para el sol se cumple que $Y = 1$

⁸ Los valores para r_{max} y v son obtenidos en SPARC.

3.2.3 Cantidad de materia oscura y de materia bariónica

Como M_T incluye tanto materia ordinaria como materia oscura, podemos afirmar que:

$$M_T = M_b + M_{dm} \dots (7)$$

Sabemos, por definición, que cuando un cuerpo no posee materia oscura se cumple que $Y = 1$ y que $M_{obs} = 0$, por lo cual $M_T = M_b$. Sustituyendo estos datos en (6), tenemos que:

$$\frac{M_b}{L} = \frac{M_\odot}{L_\odot}$$

Modificando la ecuación anterior, obtenemos la siguiente relación:

$$\frac{M_b}{M_\odot} = \frac{L}{L_\odot} \dots (8)$$

, la cual expresa que la materia bariónica, en términos de masas solares, es igual a la razón de luminosidad del objeto astronómico.

Como M_b y M_T están ambas en términos de masas solares por (5) y (8), de (7) despejamos la materia oscura, obteniendo que:

$$\frac{M_{dm}}{M_\odot} = \frac{M_T}{M_\odot} - \frac{M_b}{M_\odot} \dots (9)$$

Para calcular el porcentaje de materia oscura de una galaxia, realizamos la siguiente operación:

$$\%_{M_{dm}} = \left(\frac{\frac{M_{dm}}{M_\odot}}{\frac{M_T}{M_\odot}} \right) \times 100 \dots (10)$$

Sabemos que el término M_\odot se puede simplificar, pero en este punto del procedimiento todos los términos de la ecuación (10) son números ya calculados en (5) y (9).

4. ANÁLISIS DE DATOS DE SPARC

De la página de SPARC se descargaron los archivos *Table1.mrt* y *Rotmod_LTG.zip*, que se descarga al seleccionar la opción *Newtonian Mass Models zip file*. El primero incluye información general sobre las galaxias de la base de datos; tiene datos como la distancia a la que se encuentran, su luminosidad, su inclinación y su velocidad de rotación asintóticamente plana. El segundo es una carpeta comprimida que contiene tablas sobre cada una de las galaxias, en las cuales se muestra, entre otras cosas, la velocidad de rotación observada en función del radio.

Del archivo *Table1* se recuperaron los datos de la luminosidad de la galaxia en la banda 3.6 ($L_{[3.6]}$) y la distancia a la que se encuentra (D), mientras que de la carpeta *Rotmod_LTG* se obtuvieron los datos para graficar las curvas de rotación (Rad , para el radio; $Vobs$ para la velocidad observada y $errV$ para el margen de error). El radio máximo de la galaxia y su velocidad observada fueron obtenidos del último renglón de las tablas del archivo zip.

Para poder operar con la luminosidad $L_{[3.6]}$ fue necesario calcular la luminosidad del sol en la banda 3.6 para poder aplicar correctamente la relación masa-luz. Partiremos de la ecuación de la magnitud bolométrica a partir de la luminosidad bolométrica

$$M_{bol} = -2.512 \log_{10} \left(\frac{L_{bol}}{L_0} \right)$$

, donde L_0 es la luminosidad de una estrella con magnitud absoluta $M_{bol} = 0$, y está definida por $L_0 = 3.0128 \times 10^{28} W$.

Despejando L_{bol} de la ecuación anterior, obtenemos que:

$$L_{bol} = L_0 \times 10^{-M_{bol}/2.512}$$

Partiendo de que la magnitud absoluta del sol en la banda 3.6 es $M_{\odot[3.6]} = 3.26$, tenemos que

$$L_{\odot[3.6]} = L_0 \times 10^{-M_{\odot[3.6]}/2.512}$$

, con lo cual obtenemos que la luminosidad bolométrica del sol en la banda 3.6 es de:

$$L_{\odot[3.6]} = 1.51775 \times 10^{27} W$$

Asimismo, la luminosidad L [3.6], obtenida de SPARC, está en términos de $1 \times 10^9 L_{\odot}$, por lo cual fue necesario

multiplicar L [3.6] por un factor de $3.829 \times 10^{35} \left[\frac{W}{L_{\odot}} \right]$ para obtenerla en Watts⁹.

Otras variables que fue necesario transformar fueron V_{obs} , que hubo que convertir de $\frac{km}{s}$ a $\frac{m}{s}$ y Rad , al cual hubo que convertir de kiloparsecs a metros¹⁰.

En el apéndice del trabajo se incluye el código en Python con el cual se realizaron las operaciones mencionadas anteriormente.

5. RESULTADOS

Tabla 2. Datos generales de las galaxias a partir de las cuales se realizaron los cálculos de materia oscura.

Galaxia	Distancia [Mpc]	L [3.6] [$1 \times 10^9 L_{\odot}$]	Rad [kpc]	Vobs [$\frac{km}{s}$]
NGC55	7.06	4.628	13.4	86.5
NGC891	9.91	138.34	17.11	208.0
NGC2403	3.16	10.041	20.87	134.0
NGC5985	39.7	208.728	34.72	285

Tabla 3. Resultados de la cantidad de materia total, ordinaria y oscura de las galaxias junto con las Υ resultantes y los porcentajes de materia oscura respecto a la materia total.

Galaxia	Υ	$\frac{M_T}{M_{\odot}}$	$\frac{M_b}{M_{\odot}}$	$\frac{M_{dm}}{M_{\odot}}$	% M_{dm}
NGC55	20.1114	2.3481×10^{10}	1.1676×10^9	2.2313×10^{10}	95.0277
NGC891	4.9306	1.7208×10^{11}	3.4900×10^{10}	1.3718×10^{11}	79.7185
NGC2403	34.3895	8.7114×10^{10}	2.5332×10^9	8.4581×10^{10}	97.0921
NGC5985	12.4497	6.5558×10^{11}	5.2658×10^{10}	6.0292×10^{11}	91.9677

⁹ El anterior factor fue obtenido de multiplicar L_{\odot} por 1×10^9

¹⁰ $1 \text{ kpc} = 3.086 \times 10^{19} \text{ m}$

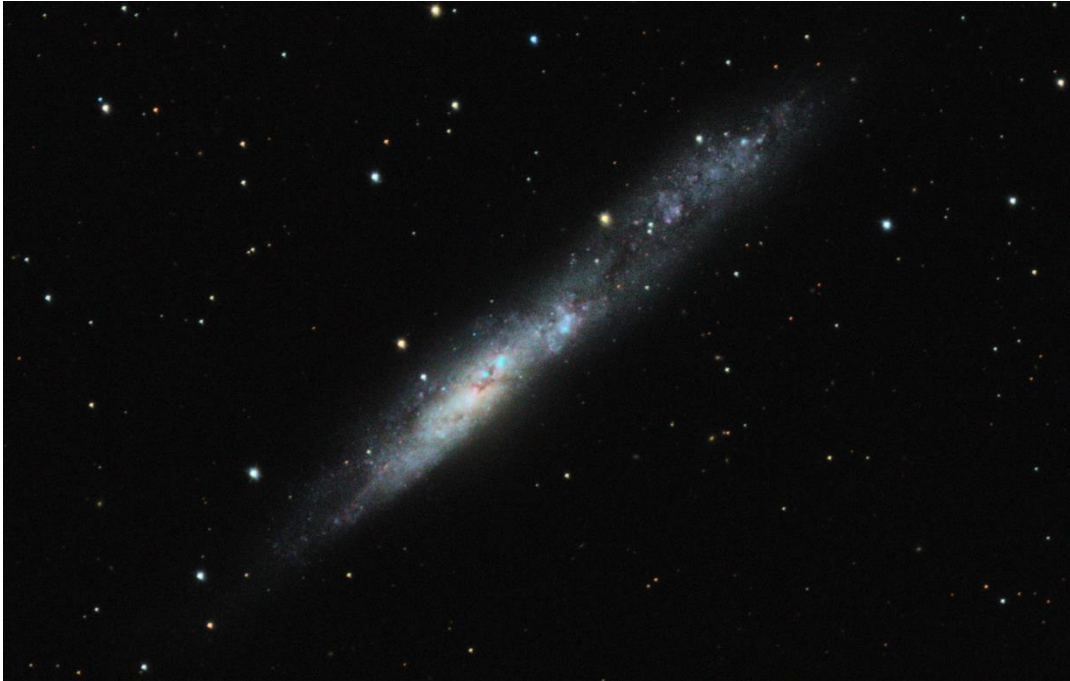


Figura 1. Imagen en LRGB de la galaxia NGC 55. Archivos FITS obtenidos con ITelescope y procesados con PixInsight. Más información en la *Tabla 1*.

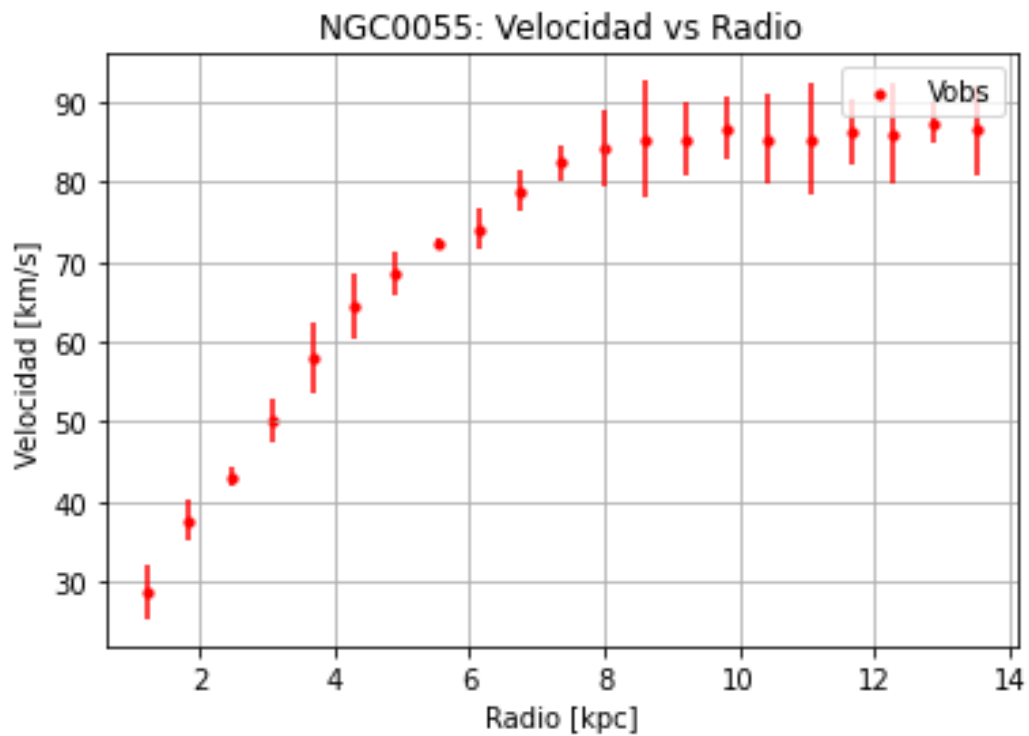


Figura 2. Curva de rotación de la galaxia NGC 55. Muestra la velocidad observada con respecto al radio de la galaxia. Datos obtenidos en SPARC y procesados en Python. Código adjunto en el apéndice.

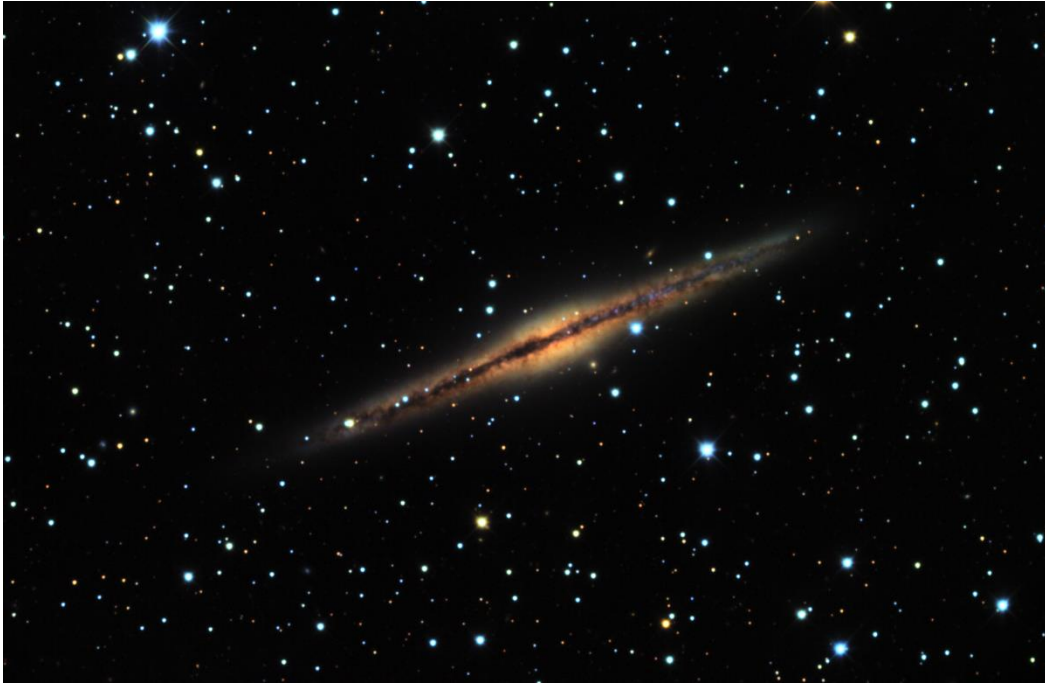


Figura 3. Imagen en LRGB de la galaxia NGC 891. Archivos FITS recuperados de *Misti Mountain Observatory* y procesados con PixInsight. Más información en la *Tabla 1*.

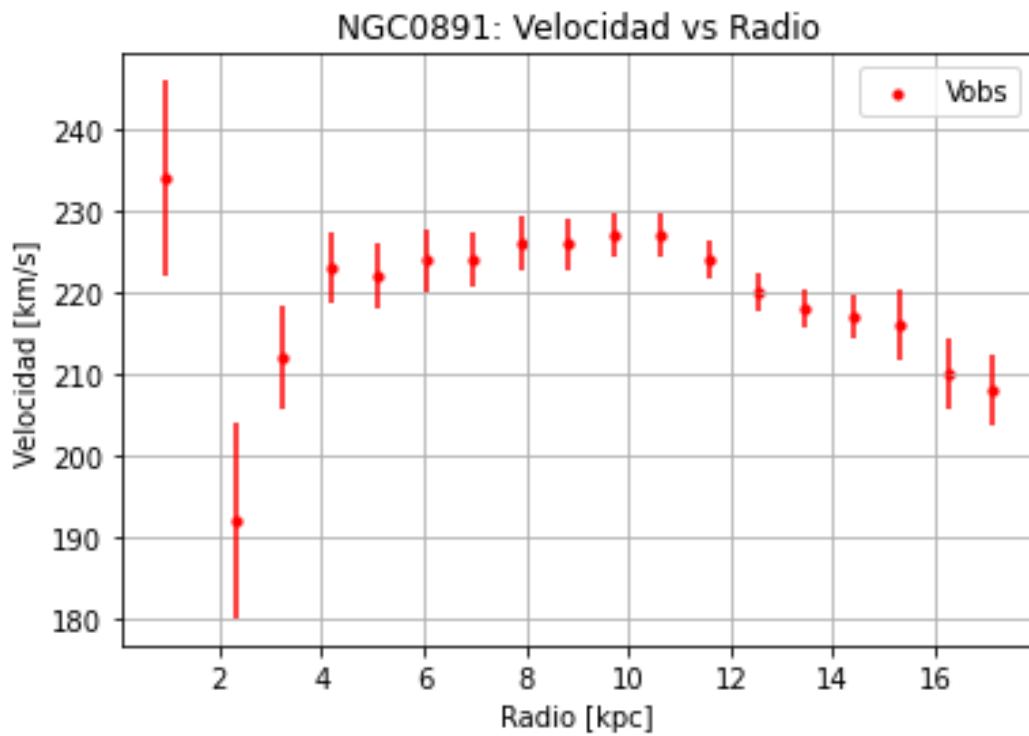


Figura 4. Curva de rotación de la galaxia NGC 891. Muestra la velocidad observada con respecto al radio de la galaxia. Datos obtenidos en SPARC y procesados en Python. Código adjunto en el apéndice.



Figura 5. Imagen en LRGB de la galaxia NGC 2403. Archivos FITS recuperados de *Misti Mountain Observatory* y procesados con PixInsight. Más información en la *Tabla 1*.

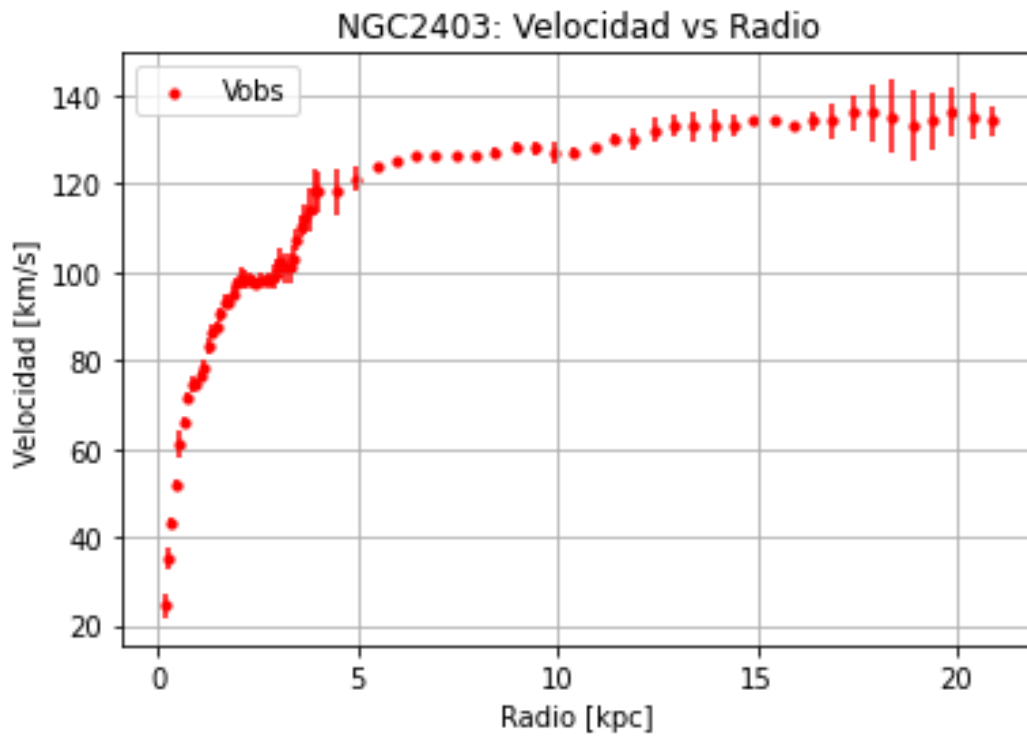


Figura 6. Curva de rotación de la galaxia NGC 2403. Muestra la velocidad observada con respecto al radio de la galaxia. Datos obtenidos en SPARC y procesados en Python. Código adjunto en el apéndice.



Figura 7. Imagen en LRGB de las galaxias NGC5981, NGC5982 y NGC 5985 (de derecha a izquierda, en ese orden). Archivos FITS recuperados de *Misti Mountain Observatory* y procesados con PixInsight. Más información en la *Tabla 1*.

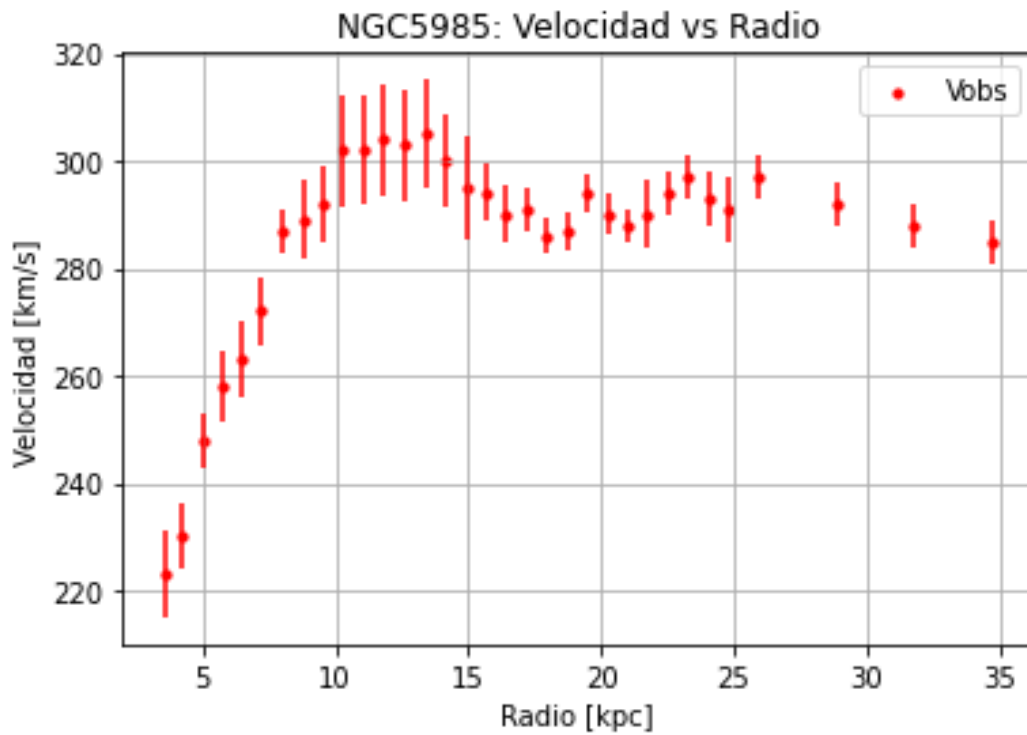


Figura 8. Curva de rotación de la galaxia NGC 5985. Muestra la velocidad observada con respecto al radio de la galaxia. Datos obtenidos en SPARC y procesados en Python. Código adjunto en el apéndice.

6. CONCLUSIÓN

En la *Tabla 3* podemos observar que, en efecto, entre mayor sea Y , mayor es el porcentaje de materia oscura que se presenta, yendo desde un 79.7185% para $Y = 4.9306$ hasta un 97.0921% para $Y = 34.3895$.

Analizando las curvas de rotación, podemos ver que, en general, todas tienden a tener la misma forma, con un gran incremento de la velocidad a un radio pequeño y con pocas variaciones en velocidad al alejarse del núcleo galáctico, lo cual es congruente con la teoría sobre la materia oscura. La cantidad de puntos que se ven en cada gráfica dependen tanto de los datos disponibles en SPARC como de la diferencia en los radios, ya que hay algunos datos que varían tan poco en radio que se ven “encimados”.

Todos los valores obtenidos del programa en Python fueron redondeados a 4 decimales, lo cual debe tomarse en cuenta si se reproduce el experimento para comprobar los resultados.

REFERENCIAS

- Cellone, S. A. (s.f.). *Materia Oscura: ¿un responsable en hechos de gravedad?* Universidad Nacional de La Plata, Argentina. Recuperado de <http://fcaglp.fcaglp.unlp.edu.ar/~scellone/Divul/MatOsc/MatOsc.html>. Visitado el 23 de julio del 2023.
- L’astronòmica de Sabadell (s.f.). *Fritz Zwicky y la materia oscura*. Recuperado de https://astrosabadell.org/pdf/es/bio/homes/Zwicky_es.pdf. Visitado el 23 de julio del 2023.
- Lelli, F., McGaugh, S.S., Schombert, J.M. (2016). “SPARC: Mass Models for 175 Disk Galaxies with Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves”, *The Astronomical Journal*, 152(6), artículo 157.
- Pettini, M. (2018). Introduction to Cosmology. Lecture 16. *Dark matter: Do we need it? What is it? Where is it? How Much?* Instituto de Astronomía de la Universidad de Cambridge, Reino Unido. Recuperado de <https://people.ast.cam.ac.uk/~pettini/Intro%20Cosmology/Lecture16.pdf>. Revisado el 23 de julio del 2023.
- Vázquez-González, A. y Matos, T. (2008). “La materia oscura del universo: retos y perspectivas”. *Revista Mexicana de Física*, 54(2), 192-202.

APÉNDICE

Código en Python

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Wed Jul 19 14:54:41
2023
@author: Pablo Alazraki
"""
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

#Constantes
G = 6.6743*10**-11
L_sol = 3.829*10**26
L_sol_3_6 = 1.51775*10**27
M_sol = 1.989*10**30

#Lectura de la Tabla 1 a partir
de un archivo de excel
Table1=pd.read_excel(r"C:\Users\Pa
blo Alazraki\Documents\Fisica
del
Universo\Proyecto\Sparc.xlsx")

#Función que recibe el nombre de
una galaxia para obtener sus
datos
#NOTA: El código supone que los
archivos .dat están modificados
(sin las unidades y sin el
comentario de distancia en Mpc)
def
lecturaArchivoConGráficas(nombre)
:
    print(f'\nLa galaxia es:
{nombre}')

    #Leemos el archivo
correspondiente a la
galaxia
FilaT1=Table1[Table1['Galax
y'] == f'{nombre}']

    #Recuperamos los datos que
mandamos como parámetros a
la función "matObsc"
L_3_6=FilaT1.iloc[0,7]*10**
9*L_sol
df_dat=pd.read_table(rf'C:\
Users\Pablo
Alazraki\Documents\Fisica
del
```

```
Universo\Proyecto\Rotmod_LT
G\{nombre}_rotmod.dat')
r = df_dat.iloc[-1,0]
V_obs = df_dat.iloc[-1,1]
matObsc(r, V_obs, L_3_6)
```

```
#Graficamos V_obs
plot=df_dat.plot.scatter(x=
'Rad', y='Vobs',
yerr='errV', c='red',
xlabel='Radio [kpc]',
ylabel='Velocidad [km/s]',
grid=True, s=10,
label='Vobs')
plt.title(f'{nombre}:
Velocidad vs Radio')
```

```
#Función para calcular el
porcentaje de materia oscura de
una galaxia
```

```
def matObsc(r,V_obs,L_3_6):
    #1) Convertimos r de kpc a
    m (factor de 3.086x10^19)
    r = r * 3.086*10**19

    #2) Convertimos V_obs de
    km/s a m/s (factor de 1000)
    V_obs = V_obs * 1000

    #3) Calculamos la masa
    dinámica y la pasamos a
    Masas Solares
    M_din = (V_obs**2) * r / G
    M_din = M_din / M_sol

    #4) Calculamos la razon de
    luminosidad de la galaxia
    en terminos de la solar
    L = L_3_6 / L_sol_3_6
```

```
#5) Calculamos Ypsilon
Ypsilon = round(M_din / L,
4)
print("Ypsilon para la masa
dinamica: ", Ypsilon)
```

```
#6) Para Ypsilon=1, M/M_sol
= L_3_6/L_sol_3_6,
calculada en el inciso 4)
M_bar = L
print("Cantidad de materia
ordinaria: ", M_bar)
```

```

#7) Calculamos la materia
oscura
M_obs = M_din - M_bar
print("Cantidad de materia
oscura: ", M_obs)

#8) Calculamos el
porcentaje
porcen = round(M_obs /
M_din * 100, 4)
print("Porcentaje de
materia oscura: ", porcen,
"%")

#-----PRUEBAS-----
lecturaArchivoConGráficas('NGC005
5')
lecturaArchivoConGráficas('NGC089
1')
lecturaArchivoConGráficas('NGC240
3')
lecturaArchivoConGráficas('NGC598
5')

```

Listado de procesos usados en PixInsight

- Cosmetic Correction
- Star Alignment
- Image Integration
- Channel Combination
- Dynamic Crop
- Dynamic Background Extraction
- Background Neutralization
- Color Calibration
- Histogram Transformation
- Curves Transformation
 - RGB Curves
 - Saturation Curves
- Local Histogram Equalization
- LRGB Combination