

# Relaciones de escala galácticas

JULEN EXPÓSITO

Universidad de La Laguna

19 de enero de 2021

## Resumen

*El radio efectivo, brillo superficial promedio y dispersión central de velocidad de los bulbos galácticos y las galaxias elípticas son magnitudes correlacionadas. Para estudiar dichas relaciones de escala se han obtenido el perfil de brillo y estructura global de diversas galaxias en la banda del infrarrojo mediante su descomposición fotométrica y su información cinemática mediante el ajuste de la distribución de velocidad de la línea de visión por espectroscopía. En este trabajo se ha realizado dicho estudio con la galaxia NGC0192 y se han tomado los resultados ajustados para otras 17 galaxias por otros estudiantes. Finalmente, se han graficado las relaciones de escala y se ha observado la correlación general esperada, si bien los datos presentan una dispersión resaltable respecto a las tendencias deducidas en la literatura.*

## I. INTRODUCCIÓN

EL plano fundamental es un conjunto de relaciones entre el radio efectivo, el brillo superficial promedio y la dispersión central de velocidad en galaxias elípticas. Nótese que estas tres magnitudes pueden relacionarse para ofrecer otras características de la galaxia, como su luminosidad, lo cual permite al plano fundamental revelar numerosas correlaciones mediante la observación empírica de esas tres magnitudes. Nos centraremos en tres de ellas:

- Un radio efectivo mayor (galaxias más grandes) implica un brillo superficial más débil. Esta relación sigue una expresión del tipo  $S \propto r_e^\gamma$  [J. Kormendy, 1977].
- Una mayor luminosidad implica una dispersión central de velocidad mayor. Analíticamente puede deducirse la siguiente relación de proporcionalidad:  $L \propto \sigma^4$  [S. M. Faber, R. E. Jackson, 1976].
- Se tiende a mantener la siguiente relación:  $\log r_e = a \log \sigma + b < \mu > + c$ .

Los bulbos típicos de las galaxias de disco suelen aproximarse bastante bien a estas relaciones de escala.

En este trabajo se han estudiado estas relaciones utilizando los datos de radio efectivo del bulbo, magnitud absoluta integrada del bulbo y dispersión central de velocidad para diversas galaxias y se obtendrá la información fotométrica y cinemática para la galaxia NGC0192 pertinente para el estudio de las relaciones de escala.

Para obtener la información fotométrica de NGC0192 se ha realizado una descomposición fotométrica bidimensional. Analizando el perfil de brillo bidimensional de una imagen CCD es posible ajustar los parámetros de diversos modelos de perfiles de brillo superficial, obteniendo así información fotométrica y geométrica sobre las distintas estructuras que forman la galaxia. La descomposición fotométrica se ha realizado usando el programa IMFIT [P. Erwin, 2015].

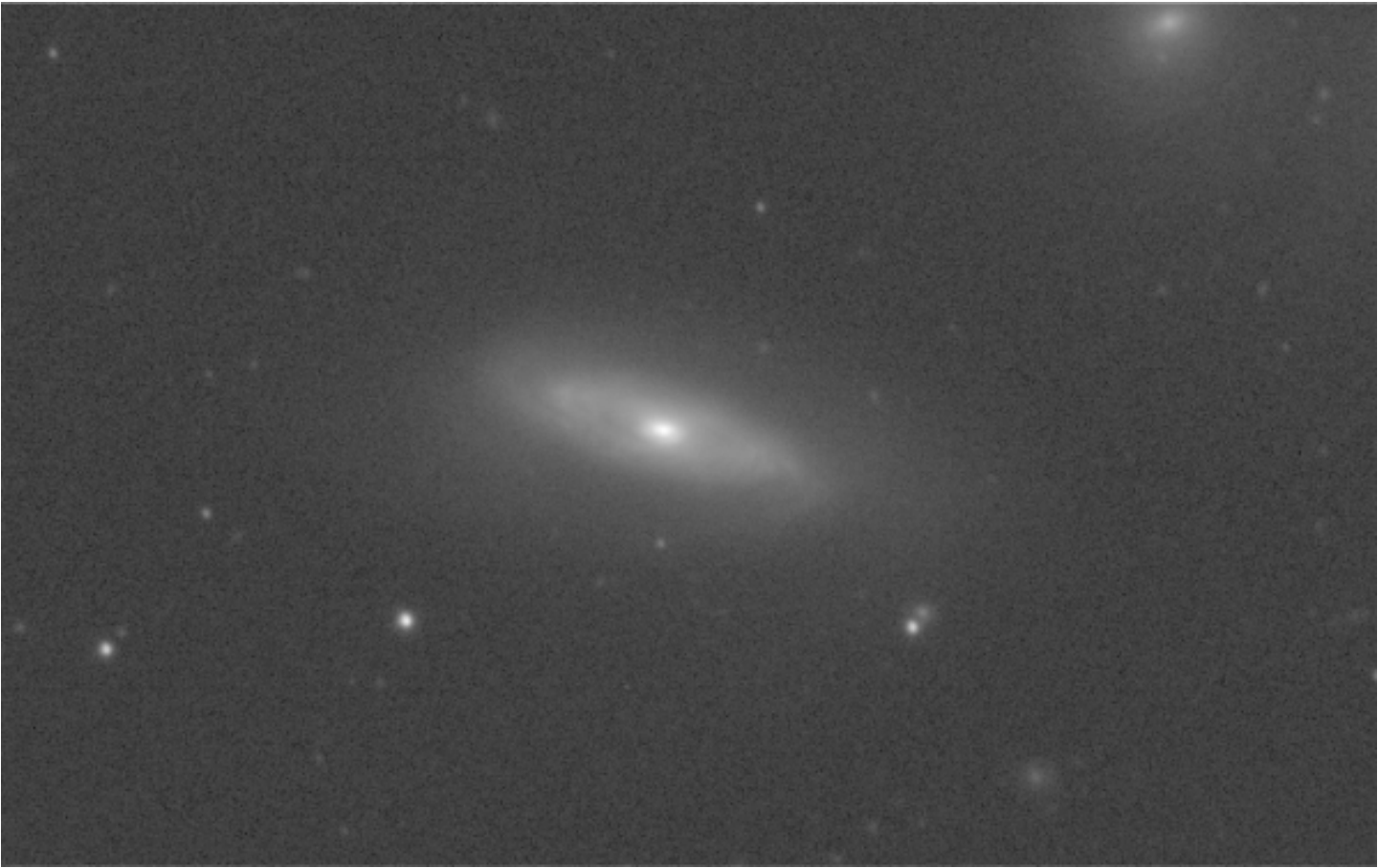
La cinemática de la galaxia se ha estudiado mediante espectrometría. Si consideramos las galaxias como sistemas puramente estelares, el espectro observado en cierto punto de la misma será la suma del espectro de las estrellas captadas afectado por el efecto doppler derivado de su velocidad en la línea de visión. El ajuste de modelos para el espectro observado de una galaxia puede, pues, darnos información relevante sobre su cinemática. En este trabajo se ha usado el programa ppxf [M. Cappellari, 2017] para obtener la velocidad

sistémica, dispersión central de velocidad y los momentos  $h_3$  y  $h_4$  (que dan cuenta, respectivamente, de la desviación asimétrica y la desviación simétrica) de la galaxia estudiada.

En la sección 2 se explica en mayor profundidad el funcionamiento de ambos programas de ajuste y la metodología seguida para la obtención de las magnitudes buscadas. En la sección 3 se presentan los resultados fotométricos y cinemáticos encontrados para NGC0192 y las relaciones de escala encontradas con los datos correspondientes a un conjunto de galaxias. En la sección 4, finalmente, se discuten los resultados obtenidos para NGC0192 y las relaciones de escala observadas.

## II. METODOLOGÍA

### I. Descomposición fotométrica con IMFIT



**Figura 1:** Imagen en infrarrojo de la galaxia NGC0192 ofrecida por SDSS DR16. Las dimensiones de la imagen son de 2048x1361 píxeles, tal que el lado de un píxel corresponde a 0.396 arcsec.

En la figura 1 puede verse la imagen de NGC0192 que se ha utilizado en este trabajo para obtener el perfil de brillo superficial de la galaxia mediante descomposición fotométrica. Para que IMFIT pueda realizar un correcto modelado del perfil de brillo se han tenido en cuenta diversas propiedades de la imagen que afectan al flujo captado y que podemos incluir en el input de IMFIT para mejorar el ajuste:

- **Ganancia:** El número de electrones captados por cada cuenta digitalizada por la CCD. Valor para nuestra imagen: 4.76 e-/ADU.
- **Nivel de cielo:** Las cuentas extra que había originalmente por el fondo, sustraídas al procesar la imagen. Valor para nuestra imagen: 187.53 cuentas.
- **Ruido gaussiano:** El ruido gaussiano presentado por la imagen. Valor para nuestra imagen: 5.06 e-.

La imagen presenta fuentes de luminosidad ajenas a la galaxia. Para que no afecten al ajuste, se han enmascarado mediante una imagen máscara que le indica a IMFIT qué píxeles ignorar.

Las imágenes astronómicas se ven afectadas también por efectos ópticos derivados del sistema de detección o el seeing (la distorsión generada sobre las imágenes causado por las turbulencias atmosféricas). La función de dispersión puntual (PSF) describe la respuesta de nuestro sistema de detección a una fuente puntual en una banda dada y su forma concreta depende de estos efectos, por lo que podemos utilizarla para que nuestro modelo tenga en cuenta estas correcciones presentes en nuestra imagen.

La función Moffat es una buena aproximación para la PSF de un telescopio común [I. Trujillo et. al., 2001]. Tenemos:

$$I(r) = \frac{I_0}{(1 + (r/\alpha)^2)^\beta}, \quad \alpha = \frac{\text{FWHM}}{2\sqrt{2^{1/\beta} - 1}}, \quad (1)$$

de forma que FWHM (full-width half-maximum) describe la anchura general del perfil y  $\beta$  la fuerza de las alas. Utilizando IRAF podemos ajustar una función Moffat a las estrellas no resueltas de nuestra imagen y conseguir así valores aproximados de FWHM y  $\beta$  para la PSF de nuestra imagen. Con dicho ajuste generamos una imagen de esa PSF, la cual podremos pedirle a IMFIT que convolucione con su modelo generado.

Como la PSF puede cambiar de un punto a otro de la imagen, se ha ajustado una función Moffat a todas las estrellas de la imagen con suficiente luminosidad para ser claramente visibles, pero no tanta como para saturar el detector, y se ha realizado una media de los parámetros ajustados obtenidos para cada estrella. Se ha obtenido:

- FWHM: 3.28 píxeles.
- $\beta = 5.8$ .

IMFIT posee numerosos perfiles de brillo superficial para ajustar en 2D y permite su superposición. Para ajustar el perfil de brillo de nuestra imagen se han utilizado las siguientes funciones:

Sérsic:

$$I(r) = I_e \exp \left\{ -b_n \left[ \left( \frac{r}{r_e} \right)^{1/n} - 1 \right] \right\}, \quad (2)$$

tal que  $I_e$  es el valor del brillo superficial a una distancia  $r = r_e$ ,  $n$  el índice de Sérsic, que da cuenta del grado de curvatura del perfil descrito, y  $b_n$  es la solución a la ecuación trascendental  $\Gamma(2n) = 2\gamma(2n, b_n)$ , donde  $\Gamma(x)$  es la función gamma y  $\gamma(x, y)$  es la función gamma incompleta.

La función de Sérsic es usualmente utilizada para describir el perfil de intensidad de una galaxia elíptica y de bulbos.

Exponencial:

$$I(r) = I_0 \exp \left( \frac{-r}{h} \right), \quad (3)$$

siendo  $I_0$  el valor del brillo superficial central y  $h$  el parámetro de escala exponencial. La función exponencial es una aproximación usual de los discos galácticos.

Anillo gaussiano:

$$I(r) = I_0 \exp \left( \frac{-(r - R_{\text{an}})^2}{2\sigma^2} \right), \quad (4)$$

siendo  $I_0$  la intensidad en  $r = R_{\text{an}}$  y  $\sigma$  la dispersión. La función describe un anillo con un perfil gaussiano centrado en  $r = R_{\text{an}}$  y es útil para la modelización del perfil de intensidad de anillos galácticos.

IMFIT exige unas condiciones iniciales de las que partir para ajustar los parámetros. Requiere del centro de la imagen, de los parámetros correspondientes a cada función y de la elipticidad y posición angular para cada una de ellas.

El centro se ha ajustado usando la función `imexam` de IRAF. Para el resto de parámetros se ha obtenido el perfil acimutal radial medio de la galaxia mediante un ajuste a una elipse, mediante el cual IRAF permite obtener el valor del brillo superficial, la elipticidad y la posición angular a lo largo de todas las isofotas de la galaxia. Las condiciones iniciales para la elipticidad y la posición angular se han definido como la media de sus valores en todos los puntos del perfil unidimensional obtenido. Los parámetros iniciales para la función de Sérsic, exponencial y anillo gaussiano se han obtenido ajustando la suma de dichas funciones al perfil de brillo superficial obtenido con IRAF mediante la función `curve_fit` del ecosistema SciPy para Python.

Nos interesa obtener los parámetros en unidades físicas. IMFIT nos devolverá el brillo superficial en cuentas/píxel y las distancias en píxeles.

Sabemos que 1 lado de píxel corresponde a 0.369 arcsec en nuestra imagen, por lo que para obtener los kiloparsecs correspondientes a un lado de píxel procedemos de la siguiente forma. Como  $\tan(r[\text{ángulo}]) = r[\text{distancia}]/d$ , siendo  $d$  la distancia a la galaxia:

$$r[\text{píxeles}] = (0.369r)[\text{arcsec}] \rightarrow d[\text{kpc}] \cdot \tan((0.369r)[\text{arcsec}]) = r[\text{kpc}].$$

La distancia podemos obtenerla a partir del redshift. Para NGC 0192,  $z = 0.013787$  [NED]. Para una constante de Hubble  $H_0 = 66.2 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  [T. Dietrich et. al., 2020], tenemos:

$$d = \frac{zc}{H_0} \approx 62440 \text{ kpc},$$

siendo  $c$  la velocidad de la luz en el vacío.

Para obtener el brillo superficial en  $\text{mag/arcsec}^2$  a partir del valor en cuentas/píxel tenemos que tener en cuenta que podamos pasar de cuentas a magnitudes usando

$$m = Z - 2.5 \log(I[\text{cuentas}]), \quad (5)$$

siendo  $Z$  la constante de calibración  $Z_{\text{cal}}$  correspondiente para nuestra imagen menos la contribución por la masa de aire  $x$  por el coeficiente de extinción  $k$  correspondiente. En nuestro caso:

- $Z_{\text{cal}} = 23.62 \text{ mag}$
- $x = 0.12$
- $k = 1.19 \text{ mag}$

Entonces, para obtener el brillo superficial en  $\text{mag/arcsec}^2$ :

$$\mu = Z - 2.5 \log\left(\frac{I[\text{cuentas}]}{1[\text{píxeles}]}\right) = Z - 2.5 \log(I[\text{cuentas}]) + 2.5 \log(0.369^2[\text{arcsec}^2]).$$

La luminosidad integrada para un perfil de brillo superficial dado en un área puede obtenerse integrando el perfil en dicho área, por lo que podemos obtener la magnitud correspondiente tanto a toda la galaxia como a cada componente de la galaxia. Suponiendo distribución elíptica y siendo  $\epsilon$  la elipticidad, tenemos:

$$I'(< R) = (1 - \epsilon) \int_0^R I(r) 2\pi r dr, \quad (6)$$

de forma que para  $I'$  dará el número de cuentas en un área dada. El número total para toda la galaxia (o de cada componente por separado) se obtiene para  $R \rightarrow \infty$ . Para obtener la magnitud absoluta integrada, y por tanto la luminosidad, solo es necesario proceder de la siguiente manera:

$$m = Z - 2.5 \log (I[\text{cuentas}]) \rightarrow M = m - 5 \log \left( \frac{d[\text{pc}]}{10[\text{pc}]} \right), \quad (7)$$

siendo  $d$  de nuevo la distancia a la que se encuentra la galaxia.

## II. Espectroscopía con ppxf

Ppxf modela el espectro mediante la siguiente función:

$$G_{\text{model}}(x) = \sum_1^K w_k [B * T_k](x) + \sum_0^L b_l P_l(x), \quad (8)$$

siendo  $T_k$  los modelos de la librería MILES para los espectros de  $K$  galaxias,  $P_l$  polinomios de legendre de orden  $l$  y  $B(x) = \mathcal{L}(cx)$ , de forma que  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $\mathcal{L}$  la distribución de velocidad en la línea de visión, expandida como

$$\mathcal{L}(v) = \frac{e^{-(1/2)y^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}} [1 + h_3 H_3(y) + h_4 H_4(y)], \quad (9)$$

donde  $y = (v - V)/\sigma$ , siendo  $V$  la velocidad sistémica y  $\sigma$  la dispersión de velocidad, y  $H_m$  son los polinomios de Hermite de orden  $m$ .

Ppxf buscará los parámetros  $V$ ,  $\sigma$ ,  $h_3$  y  $h_4$  que mejor ajusten al espectro de NGC0192, contenido en los datos ofrecidos por SDSS DR16. Se ha ajustado el espectro en el rango de longitudes de onda entre 3500 y 7000 Å.

Para realizar correctamente el ajuste es necesario tener en cuenta el efecto del redshift al que se encuentra NGC0192. Además, el modelo no predice las emisiones, y por tanto es necesario enmascararlas previamente antes de realizar el ajuste (se han marcado las líneas de emisión enmascaradas en la figura 3). El archivo de datos para NGC0192 de SDSS DR16 nos indica también el ruido asociado a cada longitud de onda (concretamente, a cada bin del espectro, dependiente de la resolución a cada longitud de onda). Esta información es útil para el cálculo de los residuos que ppxf minimiza al ajustar (pues la diferencia a cada longitud de onda entre el modelo y el espectro observado debe reducirse al orden del ruido en ese punto, no a 0), por lo que se le ha ofrecido también.

El ajuste depende también del orden del polinomio elegido. Para el espectro de NGC0192 se ha utilizado un polinomio de orden 12.

### III. Relaciones de escala

Galaxia	$M_i(\text{mag})$	$\sigma(\text{km/s})$	$r_e(\text{kpc})$	$\langle \mu_i \rangle$	Morfología
NGC0192	-24.75	156	0.79	13.31	Espiral
NGC0237	-22.84	77	1.04	15.81	Espiral
NGC0677	-27.28	280	1.36	11.96	Elíptica
MCG-01-10-019	-22.97	67	1.20	15.99	Espiral
NGC2805	-24.15	57	3.70	17.26	Espiral
NGC3106	-26.463	197	3.1486	14.60	Lenticular
NGC3158	-23.90	325	1.40	15.40	Elíptica
NGC3614	-23.06	79	2.40	17.41	Espiral
NGC5443	-22.69	117	0.42	13.99	Espiral
UGC09067	-23.12	139	1.07	15.59	Espiral
NGC5513	-26.09	178	2.34	14.32	Lenticular
NGC5587	-22.72	108	0.34	13.50	Lenticular
NGC5772	-25.01	236	0.92	13.38	Espiral
UGC09629	-25.77	223	1.47	13.63	Espiral
NGC6132	-23.17	76	2.48	17.37	Espiral
NGC6978	-24.38	164	0.99	14.17	Espiral
NGC7653	-24.80	122	1.30	14.34	Espiral
NGC7782	-25.04	208	0.88	13.25	Espiral

**Tabla 1:** Valores de magnitud integrada de bulbo, dispersión central de velocidad, radio efectivo de bulbo y brillo superficial medio de bulbo de una muestra de estrellas de SDSS DR16. Los valores fotométricos corresponden al infrarrojo.

En la tabla 1 están expuestas las galaxias que se usarán para el estudio de las relaciones de escala y sus valores de radio efectivo del bulbo, magnitud absoluta integrada del bulbo y dispersión central de velocidad. Como en las tres relaciones de interés se espera una relación de proporcionalidad formalizada (Kormendy, Faber-Jackson, equivalencia en el Plano Fundamental) se ha realizado un ajuste de los parámetros libres con `curve_fit` y se ha calculado el coeficiente de determinación  $R^2$  para estudiar la bondad del ajuste.

Para poder estudiar adecuadamente las relaciones de escala es necesario conocer, además de las tres magnitudes presentadas, el brillo superficial medio. Este se define como la luminosidad total en un área dada entre dicho área. En magnitudes por unidad de área:

$$\langle \mu \rangle = m + 2.5 \log(A), \quad (10)$$

siendo  $A$  el área que posee una magnitud integrada  $m$ . Consideramos dos aproximaciones: bulbos completamente esféricos y que la mitad de la luminosidad del bulbo está concentrada dentro de su radio efectivo (puesto que es la distancia al centro en la que el brillo se reduce a la mitad). Por tanto,  $A = \pi r_e^2$ .

El brillo superficial medio va a ser constante siempre que el ángulo al que vemos  $r_e$  cumpla la aproximación  $\tan(a) \approx a$ . Esto se cumple a distancias tales que  $d \gg r_e$ , pero no a 10 pc, por lo que no podemos aplicar directamente la magnitud absoluta para calcular el brillo superficial medio. Aun así, esto se solventa simplemente calculando la magnitud aparente que tendría el bulbo si la distancia estuviera a una distancia mucho mayor a su radio efectivo. Hemos usado  $10^8$  pc:

$$m' = Z - 2.5 \log(I_{int}/2) + 5 \log(10\text{pc}/10^8\text{pc}) = Z - 2.5 \log(I_{int}) + 2.5 \log(2) + 5 \log(10\text{pc}/10^8\text{pc}) =$$

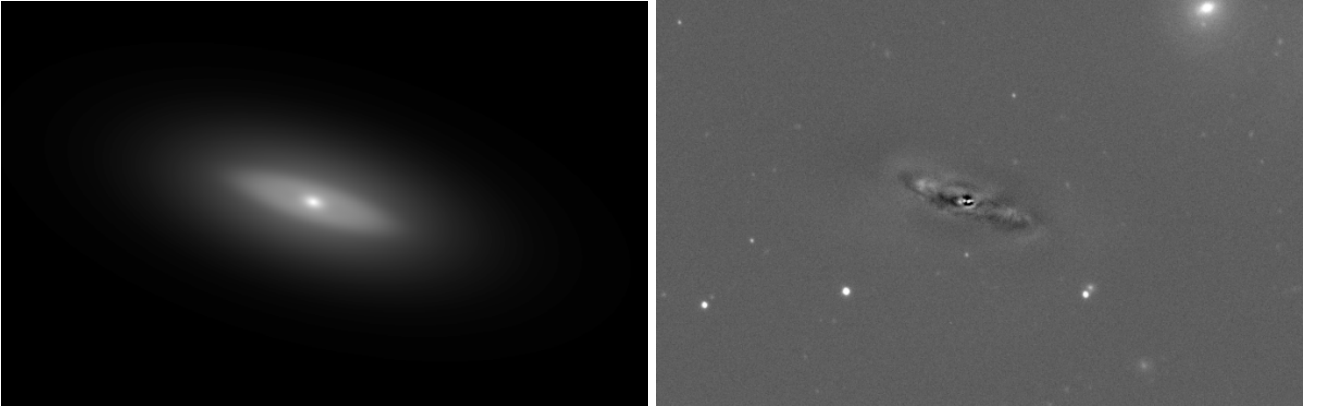
$$M + 2.5 \log(2) + 5 \log(10 \text{pc}/10^8 \text{pc}),$$

siendo  $I_{int}$  el número de cuentas tal que  $M = Z - 2.5 \log(I_{int})$  sea la magnitud absoluta integrada del bulbo. Finalmente, tenemos:

$$\langle \mu \rangle = m' + 2.5 \log \left( \pi \cdot \arctan \left( \frac{r_e [\text{pc}]}{10^8 \text{ pc}} \right)^2 [\text{arcsec}^2] \right) \approx m' + 2.5 \log \left( \pi \left( \frac{r_e [\text{pc}]}{10^8 \text{ pc}} \right)^2 [\text{arcsec}^2] \right). \quad (11)$$

### III. RESULTADOS

#### I. Descomposición fotométrica



**Figura 2:** Izquierda: Modelo fotométrico de NGC0192 en el infrarrojo ajustado por IMFIT usando un perfil de Sérsic para el bulbo, un anillo gaussiano para el anillo y una función exponencial para el disco externo. Derecha: Residuos entre la imagen original de NGC0192 y el modelo.

Se han ajustado los siguientes parámetros para un modelo fotométrico construido con una función de Sérsic, una función exponencial y una función de anillo gaussiano:

- **Sérsic:**

$$\begin{aligned} PA &= 74.65 \text{ grados} \\ \epsilon &= 0.48 \\ n &= 1.58 \\ I_e &= 14.62 \text{ mag/arcsec}^2 \\ r_e &= 0.79 \text{ kpc} \end{aligned}$$

- **Exponencial:**

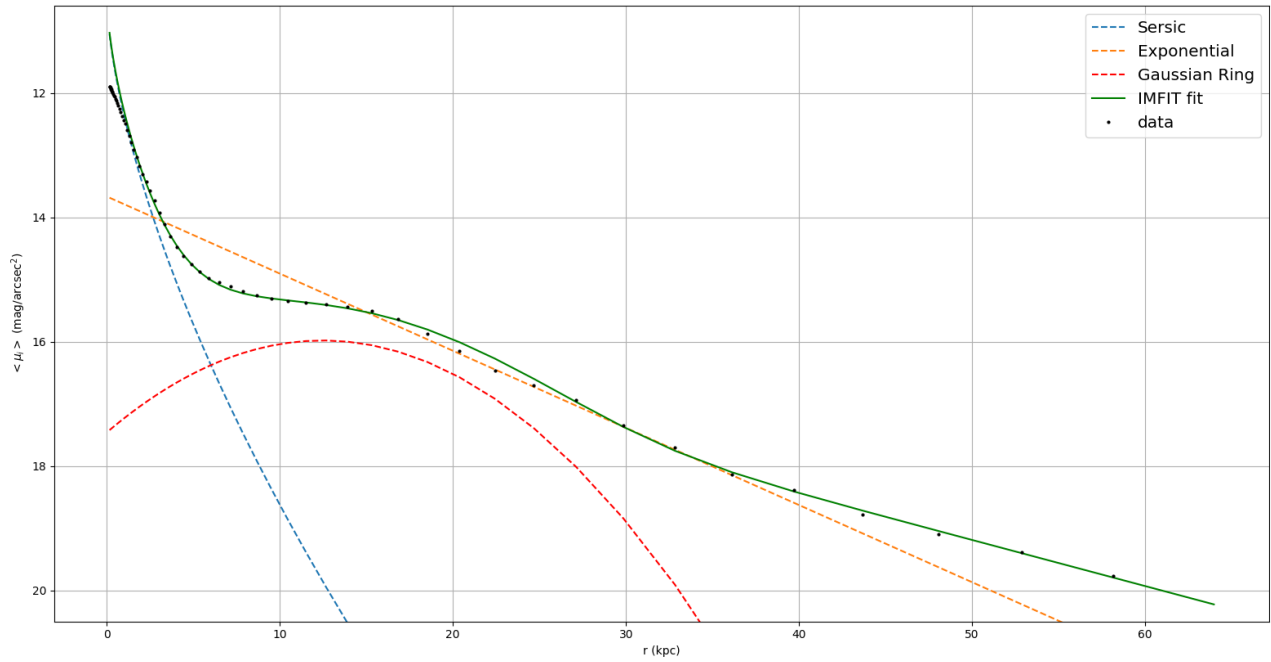
$$\begin{aligned} PA &= 75.45 \text{ grados} \\ \epsilon &= 0.57 \\ I_0 &= 16.56 \text{ mag/arcsec}^2 \\ h &= 5.39 \text{ kpc} \end{aligned}$$

- **Anillo gaussiano:**

$$\begin{aligned} PA &= 73.07 \text{ grados} \\ \epsilon &= 0.76 \\ A &= 17.06 \text{ mag/arcsec}^2 \end{aligned}$$

$$R_r = 4.60 \text{ kpc}$$

$$\sigma = 2.79 \text{ kpc}$$



**Figura 3:** Perfil de brillo radial de NGC0192 en el infrarrojo. Puntos: Valores a lo largo de las isótopas ajustadas a una elipse por IRAF. Línea continua: Ajuste del modelo realizado por IMFIT. Línea discontinua: Representación de las tres componentes del modelo; Sérsic, exponencial y anillo gaussiano.

	Sérsic	Exponencial	Anillo Gaussiano	Total
Magnitud absoluta ( $M_i$ )	-24.75	-24.84	-25.84	-26.46
$L_{\text{componente}}/L_{\text{total}}$	0.21	0.23	0.56	1.00

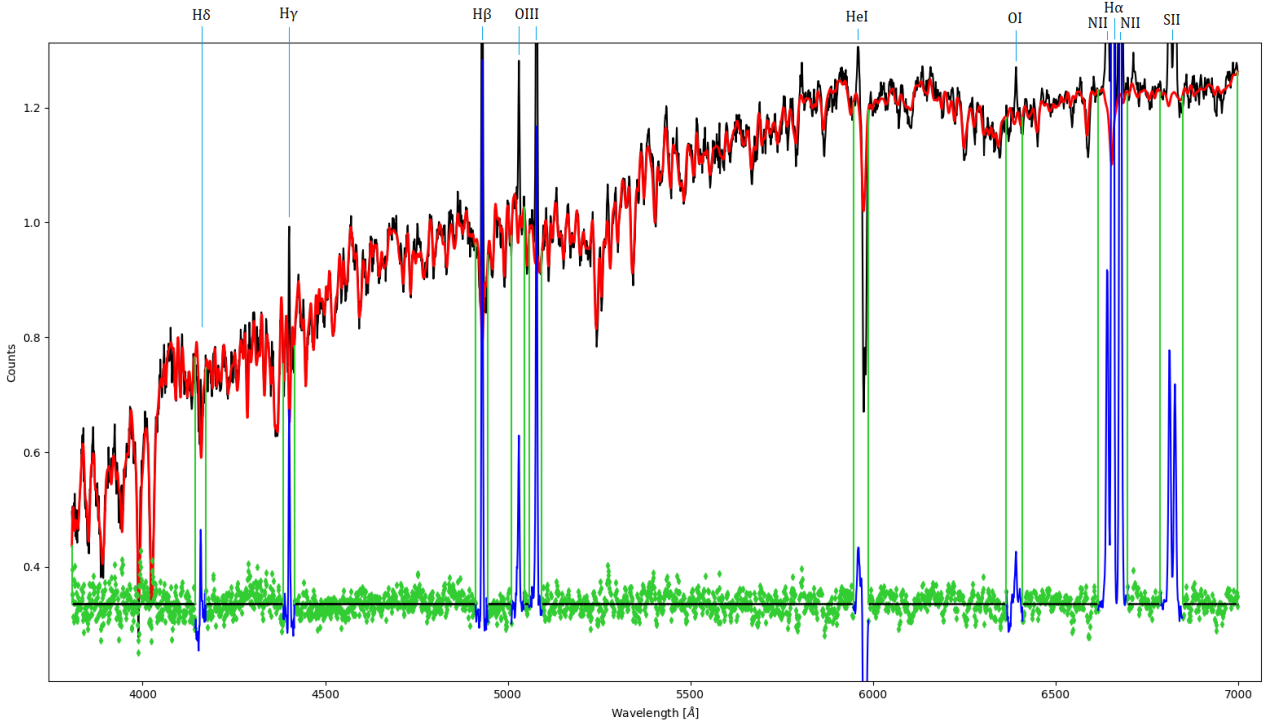
**Tabla 2:** Magnitudes absolutas integradas en el infrarrojo a lo largo de todo el espacio correspondientes al bulbo, disco y anillo de NGC0192, así como la total, junto con la fracción de luminosidad de todas las componentes respecto a la luminosidad total.

En la figura 3 puede verse la forma de las distintas componentes en el modelo fotométrico final. En la tabla 1 se expresan las magnitudes absolutas integradas de cada componente y la fracción de luminosidad a la que corresponden.

Vemos que la función sérsic efectivamente domina en la zona del bulbo y la exponencial en toda la zona del disco. El anillo gaussiano, como puede verse en la imagen de la galaxia y el modelo construido, da cuenta de un anillo encontrado en la zona interna del disco. Dicho anillo presenta más de la mitad de la luminosidad de la galaxia.



## II. Espectrometría



**Figura 4:** Espectro de NGC0192 ajustado en el rango óptico entre 3500 y 7000 Å. Negro: Espectro observado. Rojo: Ajuste realizado por ppxf. En la parte inferior del gráfico están representados los residuos en verde. Las líneas verdes verticales indican rangos enmascarados y en la parte superior se indica la línea de emisión a la que corresponden.

Se han ajustado los siguientes parámetros al espectro observado:

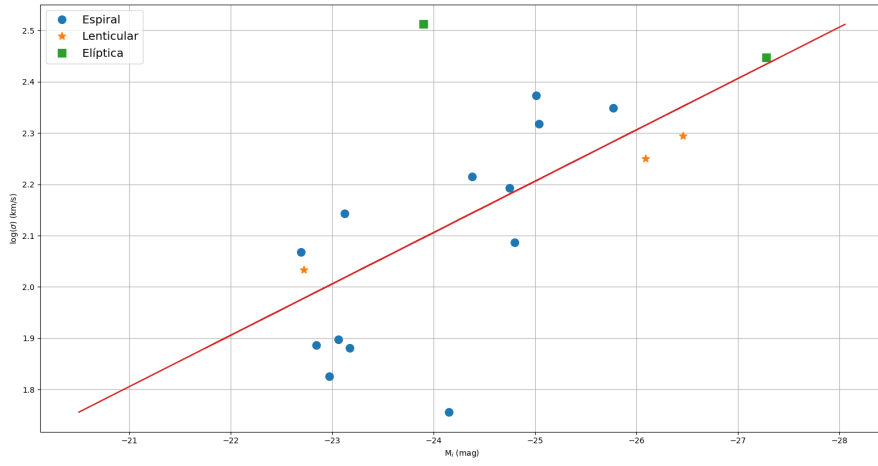
- **Velocidad sistémica:**  
 $V_{\text{sys}} = 4294 \pm 3.2 \text{ km/s}$
- **Dispersión de velocidad:**  
 $\sigma = 156 \pm 3.9 \text{ km/s}$
- **Momentos de orden superior:**  
 $h3 = -0.057 \pm 0.017$   
 $h4 = -0.006 \pm 0.019$

Como era esperable, la velocidad y el tercer momento de la dispersión de velocidad en la línea de visión tienen signos opuestos. Sobre la anisotropía orbital no es posible sacar información concluyente, pues el error es mucho mayor al valor ajustado.

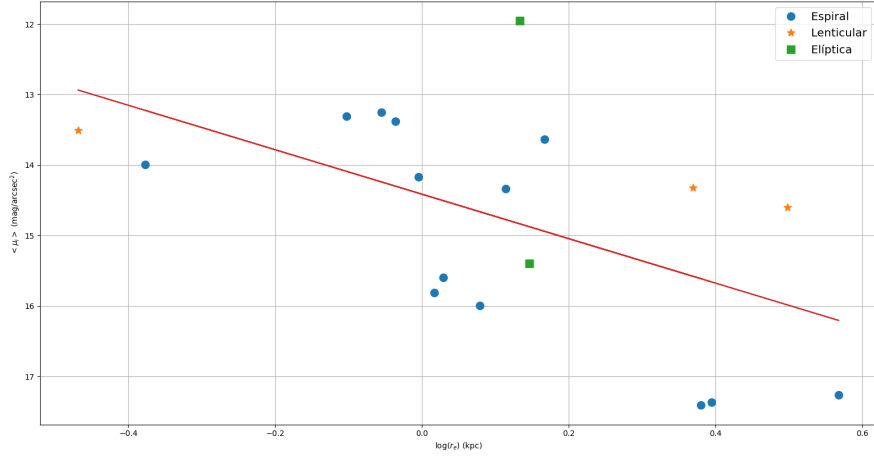
## III. Relaciones de escala

Se han ajustado las relaciones de proporcionalidad de Faber-Jackson y Kormendy a los datos de la tabla 1. A su vez, se han ajustado los parámetros libres de la ecuación  $\log r_e = a \log \sigma + b < \mu > + c$  a dichos datos.

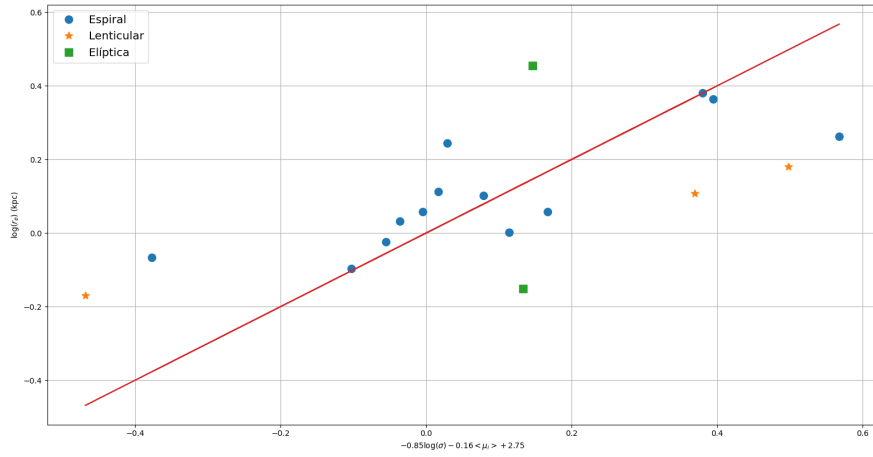
Ante el limitado número de galaxias lenticulares y elípticas se ha decidido hacer un único ajuste a todas en conjunto.



**Figura 5:** Relación entre la dispersión de velocidad y el brillo superficial medio del bulbo. Puntos: valores observacionales para las galaxias estudiadas, distinguidas por tipo. Recta: Relación Faber-Jackson ajustada para  $L \propto \sigma^4$ .



**Figura 6:** Relación entre el brillo superficial medio y el radio efectivo del bulbo. Puntos: valores observacionales para las galaxias estudiadas, distinguidas por tipo. Recta: Relación de Kormendy ajustada para  $\langle \mu_i \rangle \propto r_e^\gamma$ .  $\gamma = -1.26$

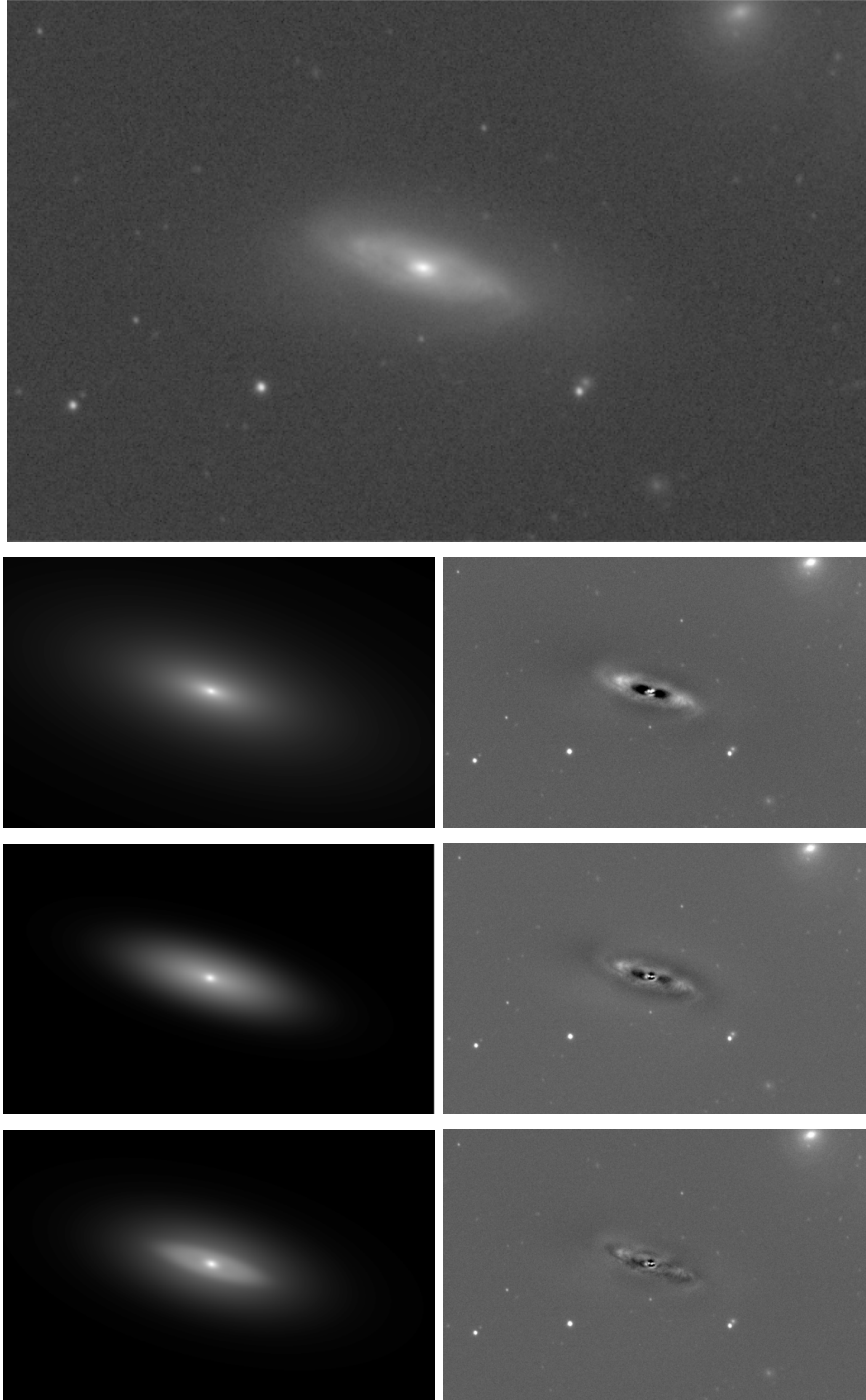


**Figura 7:** Radio efectivo del bulbo frente a  $a \log \sigma + bS + c$ , ajustando los datos a la recta  $\log r_e = a \log \sigma + bS + c$ . Puntos: valores observacionales para las galaxias estudiadas, distinguidas por tipo. Recta:  $x=y$ .  $a = -0.85$ ,  $b = -0.16$ ,  $c = 2.75$ .

## IV. DISCUSIÓN

### I. Estructura de NGC0192

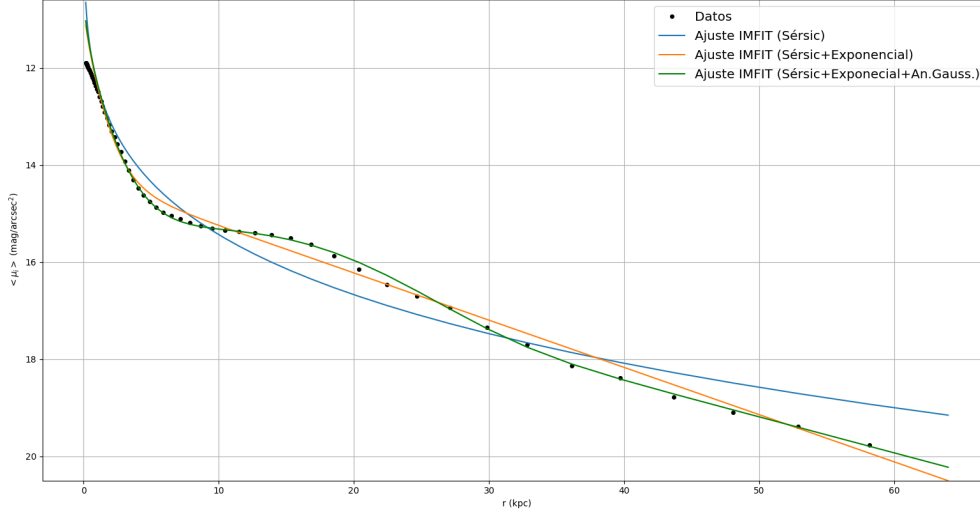
La elección de qué funciones utilizar para modelizar el perfil de brillo de una galaxia requiere de una suposición inicial de cuáles son sus componentes y a qué perfil analítico pueden corresponderse mejor. Usualmente es necesario realizar varias pruebas, a fin de buscar qué combinación de funciones llevan a un mejor ajuste y definir como conclusión qué estructuras presenta la galaxia.



**Figura 8:** Ajustes fotométricos a la imagen infrarroja de la galaxia NGC0192. Primera línea: Imagen CCD de NGC0192. Segunda línea: Modelo ajustado y residuos resultantes usando una única función de Sérsic. Tercera línea: Modelo ajustado y residuos resultantes usando una función de Sérsic mas una función exponencial. Cuarta línea: Modelo ajustado y residuos resultantes usando una función de Sérsic, una función exponencial y una función de anillo gaussiano.

	Sérsic	Sérsic + Exponencial	Sérsic + Exponencial + Anillo Gaussiano
$\chi^2/DOF$	5.97	2.94	1.94
AIC	326847.20	160892.23	106414.88
BIC	326909.57	160990.25	106557.45

**Tabla 3:** Parámetros de bondad de ajuste para cada uno de los tres modelos construidos.



**Figura 9:** Perfil de brillo radial de NGC0192 en el infrarrojo. Puntos: Valores a lo largo de las isófonas ajustadas a una elipse por IRAF. Líneas: Funciones ajustadas por IMFIT para los diferentes modelos.

En la figura 8 pueden observarse la imagen infrarroja de NGC0192 junto con tres modelos ajustados por IMFIT y sus respectivos residuos y en la figura 9 puede verse el ajuste de los tres modelos a los datos a lo largo de las isófonas en una dimensión. En la tabla 3 están presentadas las bondades de ajuste correspondientes a cada modelo.

En la imagen de la galaxia puede verse que es una galaxia espiral, aparentemente temprana. Se puede distinguir claramente el bulbo del disco y podemos ver una reducción repentina de brillo captado a cierto rango de distancia del centro. De igual forma, puede notarse un brillo inferior en los alrededores del bulbo que sube con la distancia hasta luego volver a reducirse con el aumento de la misma. Esto podría deberse a una estructura de anillo o a una barra no visible a primera vista.

El modelo ajustado únicamente por Sérsic es el que peor ajusta. Esto es esperable: el modelo es incapaz de distinguir entre bulbo y disco y Sérsic se ve obligado a dilatarse y expandirse para cubrir toda la galaxia. Esto causa lo que puede notarse en el residuo y con mayor claridad en el ajuste unidimensional: una zona alrededor del bulbo con un brillo deducido por el modelo demasiado grande y unas zonas externas infrarrepresentadas en el modelo.

Añadir una exponencial mejora significativamente el ajuste. Puede verse en el modelo que, efectivamente, la exponencial ha pasado a ocuparse del disco y Sérsic ha podido reducir su radio efectivo de forma que domina en la zona correspondiente al bulbo en la imagen original. Encontramos, atendiendo a los residuos, tres fuentes de error en este ajuste: no simula la zona oscurecida en los alrededores del bulbo comentada anteriormente, sobrerrepresenta las zonas externas porque no simula la bajada repentina de brillo que hay a cierta distancia, y no da cuenta de la dependencia angular en el brillo que posee la galaxia, derivada de su morfología espiral.

El último punto es insalvable debido a la simetría elíptica de las funciones, pero los dos anteriores parecen indicar la presencia de una tercera estructura. Una barra no podría solucionar el segundo, pero un anillo permitiría simular la zona intermedia en la que encontramos una luminosidad superior, potencialmente solucionando ambos problemas.

Efectivamente, la inclusión de un anillo gaussiano lleva a una bondad de ajuste notoriamente superior y el modelo generado parece simular más adecuadamente la galaxia. Los residuos no muestran ninguna fuente de error clara ajena a la falta de simetría elíptica. Esto parece indicar que NGC0192 presenta un anillo, si bien convendría realizar un estudio fotométrico en mayor profundidad, realizando pruebas con diversos perfiles que puedan llevar a mejor ajuste. NED cataloga a NGC0192 como una galaxia de tipo SB(r)a [G. De Vaucouleurs et. al., 1994], por lo que muy probablemente la inclusión de un modelo de barra, como el perfil de Ferrers, mejoraría aún más el ajuste.

## II. Ajuste a las relaciones de escala

Para valorar la bondad de ajuste se han calculado los siguientes coeficientes de determinación para las tres relaciones representadas:

$$R_{F-J}^2 = 0.38, \quad R_K^2 = 0.30, \quad R_{FP}^2 = 0.44,$$

siendo  $R_{F-J}^2$ ,  $R_K^2$  y  $R_{FP}^2$  los coeficientes correspondientes, respectivamente, a Faber-Jackson, Kormendy y la igualdad mantenida en el Plano Fundamental. Idealmente,  $R^2 = 1$ , pero, como era esperable en base a la dispersión de puntos encontrada en las gráficas, la bondad es poco satisfactoria. Aun así se presenta cierta correlación que parece indicar un problema de precisión, más que un problema en la relación esperada. La relación de Kormendy, concretamente, se ha ajustado para una  $\gamma$  similar al valor ajustado en estudios con otras muestras en la banda infrarroja [J. Kormendy, 1977].

No hay suficientes galaxias lenticulares y elípticas para poder sacar conclusiones respecto al efecto en las relaciones de escala que tiene considerar galaxias elípticas o bulbos de galaxias espirales. La enorme dispersión se debe probablemente a una esperada incertidumbre resaltable en los valores de radio efectivo de bulbo, magnitud integrada del bulbo y velocidad de dispersión central obtenidos para las diferentes galaxias. NGC0192 ha presentado un índice de Sérsic para el bulbo bastante cercano a 1, lo cual lleva a pensar que su bulbo es de tipo disco. Es esperable que los bulbos de tipo disco no se adecuen especialmente bien a las relaciones de escala para galaxias elípticas, y una fuerte presencia de galaxias con bulbos tipo disco en los datos podría también explicar parte de la dispersión.

La magnitud y el radio obtenidos son fuertemente dependientes del modelo utilizado. La mayoría de las galaxias de la muestra se han ajustado fotométricamente considerando únicamente una función Sérsic y una exponencial, por lo que se ha ignorado toda estructura ajena al disco y al bulbo, así como cualquier asimetría en la distribución de brillo.

Por otro lado, el modelo de ppxf no considera los efectos de extinción, no realiza sustracción de cielo y no tiene en cuenta que los diferentes modelos de espectros utilizados de referencia tienen diferentes LOSVDs, sino que considera el mismo para todos, por lo que el valor obtenido podría diferir del real.

Igualmente, aun con resultados muy imprecisos, el estudio fotométrico y cinemático simple que hemos realizado ya permite apreciar las tendencias que se observan en la relación entre las diferentes características de los bulbos galácticos.

## REFERENCIAS

- [M. Cappellari, 2017] Improving the full spectrum fitting method: accurate convolution with Gauss-Hermite functions, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 466, Issue 1, p.798-811.
- [W. Dehnen et. al., 2006] The velocity dispersion and mass profile of the Milky Way, arXiv:astro-ph/0603825
- [G. De Vaucouleurs et. al., 1994] RC3 - Third Reference Catalog of Bright Galaxies, Astron. J., Volume 108, p.2128-2144.

- 
- [T. Dietrich et. al., 2020] Multi-messenger constraints on the neutron-star equation of state and the Hubble constant, *Science*, Vol. 370, Issue 6523, pp. 1450-1453.
- [G. Djorgovski et. al., 1999] The Fundamental Plane of Elliptical Galaxies: An Overview, and Some New Results, *ASP Conference Series.*, Volume 86.
- [P. Erwin, 2015] IMFIT: a fast, flexible new program for astronomical image fitting, *Astrophysical Journal*, Vol. 799, p. 226-242.
- [S. M. Faber, R. E. Jackson, 1976] Velocity dispersions and mass-to-light ratios for elliptical galaxies, *Astrophysical Journal*, Vol. 204, p. 668-683.
- [J. Kormendy, 1977] Brightness distributions in compact and normal galaxies. II. Structure parameters of the spheroidal component, *Astrophysical Journal*, Vol. 218, p. 333-346.
- [NED] NASA/IPAC Extragalactic Database, NGC 0192.
- [I. Trujillo et. al., 2001] The effects of seeing on Sérsic profiles – II. The Moffat PSF, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 328, Issue 3, December 2001, Pages 977–985.