

Perfiles de Brillo Superficial

Hollman Daniel Quintero Salazar

Septiembre 2022

Es bastante intuitivo concebir que, para una determinada galaxia, la cantidad de estrellas (y materia radiante) disminuye hacia las partes mas externas, por consiguiente, la luminosidad asociada a la galaxia debería seguir algún tipo de función que asuma como variable independiente el radio, es decir, la distancia al centro. Como resultado del decremento en la densidad de estrellas, el brillo superficial ($mag/arcsec^2$) disminuye de manera inversamente proporcional al radio. La forma en que disminuye el brillo superficial es descrito por un perfil de luminosidad.

Los perfiles de luminosidad para galaxias comúnmente más observados son el perfil exponencial y el perfil de De Vaucouleurs, sin embargo, y como se comentará más adelante, ambos son condiciones especiales de un perfil mucho más general denominado perfil de Sérsic (Carroll and Ostlie 2017). Galaxias con un perfil de luminosidad exponencial se pueden describir mediante la forma:

$$\mu(r) = \mu_0 \cdot e^{-\beta \frac{r}{r_e}} \quad (1)$$

Donde $\mu(r)$ representa el brillo superficial a un radio r , μ_0 es la medición de brillo central y r_e la escala de longitud la cual es una medida que representa el radio al cual el brillo de la galaxia ha decaído por un factor e a partir del centro. β se escoge de manera que la mitad del total de luz galáctica sea emitida en distancias menores a r_e .

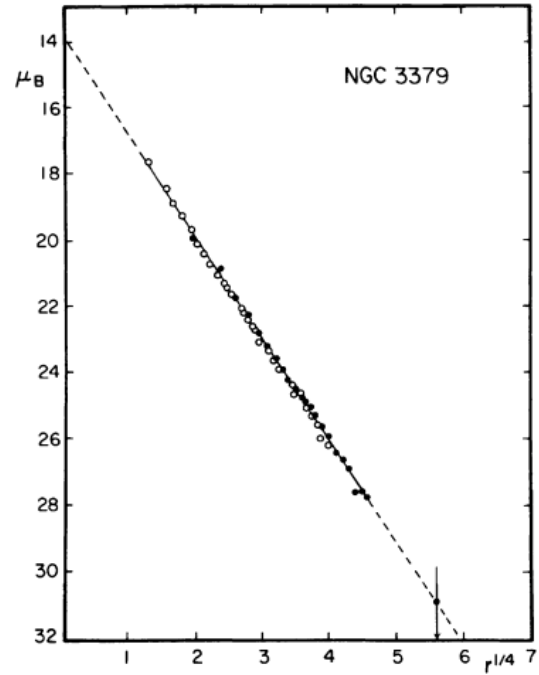


Figura 1: Perfil de luminosidad para la galaxia elíptica NGC 3379. Fuente: *Keeton 2014*

Los discos de galaxias espirales generalmente exhiben perfiles de luminosidad exponenciales. Las galaxias elípticas y los bulbos de las galaxias espirales por el contrario exhiben perfiles de luminosidad según una ley empírica conocida como perfil de De Vaucouleurs (ver figura 1), de la forma:

$$\mu(r) = \mu_0 \cdot e^{-\beta \frac{r}{r_e}^{1/4}} \quad (2)$$

De la misma manera, la ecuación 2 puede expresarse como:

$$\ln I(R) = \ln I_0 - kR^{1/4} \quad (3)$$

Donde I_0 es la intensidad (erg/cm^2 o unidades equivalentes) a un radio $R = 0$. Gérard de Vaucouleurs formuló esta relación en el año 1948. Sin embargo, en 1963 el científico argentino Jose Luis Sérsic halló de forma independiente un perfil que engloba de un modo general el perfil exponencial y el perfil de De Vaucouleurs de la forma:

$$\ln I(R) = \ln I_0 - kR^{1/n} \quad (4)$$

En donde n es un número que oscila aproximadamente entre 1 y 10 (ver figura 2). Como se mencionó previamente, el perfil de De Vaucouleurs ajusta bastante bien para galaxias elípticas y asume un valor de $n = 4$.

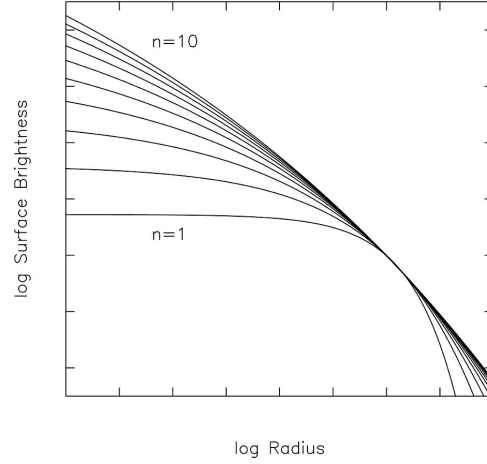


Figura 2: Perfiles de Sérsic con diferentes índices. El orden se invierte para radios grandes. Fuente: <https://bit.ly/3BrXDz3>

También es importante recalcar el uso e importancia que tienen los perfiles de luminosidad en la Vía Láctea y como se relaciona esto con distintos tipos de galaxias. Para considerar, en todas las galaxias las estrellas más antiguas tienen una distribución más o menos circular, en el bulbo de la Vía Láctea este componente está representado por las estrellas de población II.

Las estrellas del bulbo cubren una amplia gama de metalicidades, oscilando entre $-1 \lesssim [Fe/H] \lesssim +0.6$, con una media de alrededor de 0.3, es decir, la metalicidad media es aproximadamente el doble que la del Sol. La metalicidad también cambia en función de la distancia desde el centro, y las estrellas más distantes tienen un valor menor de $[Fe/H]$. La alta metalicidad significa que las estrellas del bulbo se formaron bastante tarde, según la relación edad-metalicidad, o que se trata de una población antigua con actividades de formación estelar muy intensas en una época cósmica temprana (Schneider 2006).

La población de estrellas viejas se puede estudiar mejor en elípticas, que solo contienen este componente. La distribución del brillo superficial en las galaxias elípticas y en los bulbos de las galaxias espirales siguen bastante bien el perfil de De Vaucouleurs (ecuación 3, figura 1). A partir de lo anterior se puede enunciar que dentro de la Vía Láctea, e igualmente en las galaxias espirales con bulbo, hay una pequeña galaxia elíptica.

Por otra parte, se tiene que las galaxias S0 y espirales en general presentan un disco estelar masivo y brillante (ver figura 3). En la Vía Láctea el disco está formado por estrellas de población I, así pues, tales estructuras presentan un perfil de tipo exponencial representado por la ecuación 1 (Karttunen et al. 2007). Es bastante razonable concluir que, acorde a las relaciones de luminosidad y poblaciones estelares para bulbos, discos, galaxias elípticas y espirales se puede asociar una medida de longevidad para cada galaxia asociado a su perfil de luminosidad.

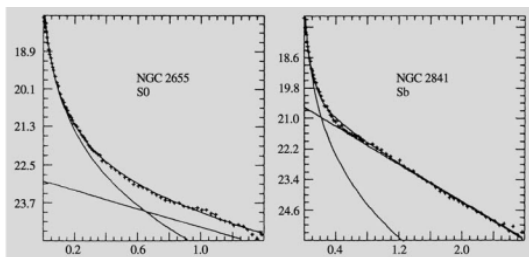


Figura 3: Perfil de luminosidad para galaxias espirales tipo S0 y Sb. Es bastante apreciable la influencia independiente tanto del disco(1) como del bulbo (2) en el perfil general Fuente: *Karttunen et al. 2007*

La mayoría de galaxias ajustan de manera óptima al perfil de Sérsic, por ejemplo, los mejores ajustes para el valor n se correlacionan con el tamaño y la luminosidad de la galaxia, de modo que las galaxias más grandes y brillantes tienden a encajar con un n más grande,

no obstante, al ser una ley empírica tiene cierta excepciones (galaxias cD por ejemplo). Algunas aplicaciones bastante relevantes de la correlación del índice de Sérsic van desde determinar la morfología de las galaxias o estimar la masa de los agujeros negros supermasivos que habitan en el centro de las galaxias más grandes hasta describir los halos de materia oscura galácticos.

APÉNDICE MATEMÁTICO

Tal como se menciona en instancias previas de este texto, las galaxias espirales comúnmente presentan un perfil de luminosidad de tipo exponencial (después de haber realizado correcciones por inclinación):

$$I(R) = I_0 e^{-R/R_d}$$

La luminosidad total entonces vendrá dada por $L = \int_0^\infty I(R) R dR$. Resolviendo la integral da como resultado $L_{tot} = 2\pi R_d^2 I_0$. Esto también se puede expresar como (m para magnitud aparente):

$$m = m_0 + \frac{2.5}{\ln 10} \left(\frac{R}{R_d} \right) = m_0 + 1.09 \left(\frac{R}{R_d} \right)$$

Las galaxias elípticas siguen el perfil de De Vaucouleurs tal que,

$$I(R) = I_0 e^{-[R/R_0]^{1/4}}$$

en donde I_0 es el brillo superficial en el centro y R_0 la escala de longitud. Usando la forma $u = R/R_0^{1/4}$ la luminosidad total viene dada por,

$$L_{tot} = 8\pi R_0^2 I_0 \int_0^\infty u^7 e^{-u} du$$

Usando la siguiente identidad se llega a la conclusión que,

Así pues, sabiendo que $R_e/R_0^{1/4}$ se pueden enunciar las siguientes expresiones que son bastante útiles,

$$I(R) = I_e e^{-7.669[R/R_e^{1/4}-1]}$$

$$\int_0^{u_0} u^n e^{-u} du = n![1 - e^{-u}(1+u+u^2/2!+\dots+u^n/n!)]^m = m_e - 2.5(-7.669)/\ln 10[R/R_e^{1/4} - 1]$$

$$L_{tot} = 8\pi 7! R_0^2 I_0$$

$$m = m_e + 8.3268[R/R_e^{1/4} - 1]$$

Como se expresó en instancias anteriores, es común expresar el perfil de De Vaucouleurs con el radio efectivo R_e (el radio que contiene exactamente la mitad de la luz emitida). Para calcular este radio se necesita resolver entonces,

$$2\pi \int_0^{R_e} I(R) R dR = \frac{L_{tot}}{2}$$

REFERENCIAS

- Carroll, Bradley W and Dale A Ostlie (2017). *An introduction to modern astrophysics*. Cambridge University Press.
- Karttunen, Hannu et al. (2007). *Fundamental astronomy*. Springer.
- Keeton, Charles (2014). *Principles of Astrophysics*. Springer.
- Schneider, Peter (2006). *Extragalactic astronomy and cosmology: an introduction*. Vol. 146. Springer.