

# Estudio del perfil de masa de NGC 3377 mediante diversos trazadores del halo

J.P. Caso<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Ciencias Planetarias, Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

Contacto / jpcaso@fcaglp.unlp.edu.ar

**Resumen** / Se presentan resultados preliminares del análisis del perfil de masa de la galaxia elíptica NGC 3377. Para esto, se propone aplicar estadística Bayesiana, utilizando simulaciones cosmológicas de materia oscura para definir las distribuciones *a priori*. Se asume un perfil de NFW y se aplica análisis de Jeans esférico, suponiendo distintos valores de anisotropía constante. El conjunto de datos disponibles para esta galaxia incluye observaciones espectroscópicas en modo ranura larga, obtenidas a partir de la participación argentina en el observatorio Gemini, junto con sendas muestras de cúmulos globulares y nebulosas planetarias disponibles en la literatura.

**Abstract** / This work presents preliminary results of the mass profile analysis for the elliptical galaxy NGC 3377. This goal is achieved applying Bayesian statistics, with *priori* distributions generated from haloes in dark matter cosmological simulations. It is assumed a NFW profile and spherical Jeans analysis is applied, considering different values of constant anisotropy. The observational data set correspond to Gemini/GMOS long-slit observations aligned with the axes of the galaxy, and supplemented with data from the literature for the globular clusters and planetary nebulae.

**Keywords** / galaxies: elliptical and lenticular, cD — galaxies: individual (NGC 3377) — galaxies: halos

## 1. Introducción

La distribución de masa en galaxias de tipo temprano suele estar dominada por su halo de materia oscura, rigiendo muchos aspectos de su evolución (e.g. White & Frenk, 1991). El estudio de su presencia en galaxias situadas en distintos ambientes permite determinar la influencia de estos en los procesos que rigen la acreción de masa (Wang et al., 2011). En este sentido, el análisis de sus efectos en la dinámica de diversos trazadores, como cúmulos globulares (CGs) y nebulosas planetarias (PNe, por sus siglas en inglés), ha permitido estudiar sus características en numerosas galaxias masivas de tipo temprano (e.g. Napolitano et al., 2011; Richtler et al., 2015). No obstante, esto es particularmente desafiante en el caso de galaxias satélites, ya que la escasez de miembros en estas poblaciones de trazadores impone restricciones al análisis. Los resultados en este tipo de galaxias son relevantes, puesto que los trabajos numéricos predicen que sus halos pierden una gran fracción de su masa tras ser acretada por un halo más masivo (e.g. van den Bosch et al., 2018; Drakos et al., 2020).

El grupo de Leo I consta de un cuerpo principal dominado por la galaxia M 96, que contiene siete galaxias brillantes y una población de galaxias enanas (Müller et al., 2018). Entre estos miembros, NGC 3377 es una elíptica elongada (E5-6 de Vaucouleurs et al., 1991), cuya cinemática hasta el radio efectivo corresponde a un rotador rápido (Emsellem et al., 2011). En este trabajo se asume una distancia de 10.6 Mpc (Tully et al., 2013) para NGC 3377.

Se propone aplicar estadística Bayesiana, usando si-

mulaciones cosmológicas de materia oscura para definir las distribuciones *a priori*, y determinar la función de probabilidad para cada trazador individual. El conjunto de datos disponibles para esta galaxia incluye observaciones espectroscópicas en modo ranura larga, obtenidas a partir de la participación argentina en el observatorio Gemini, junto con sendas muestras de CGs y PNe disponibles en la literatura.

## 2. Datos observacionales

Este trabajo se vale de observaciones espectroscópicas en modo ranura larga obtenidas mediante Gemini/GMOS (GN-2020B-Q-401) en dos direcciones, coincidentes con los semiejes de NGC 3377. Las observaciones fueron realizadas con la red B600\_G5307, con ranuras de 1 arcsec. Las mismas fueron reducidas mediante IRAF (version V2.16), siguiendo el procedimiento usual. Los espectros bidimensionales se segmentan en rangos radiales para alcanzar  $S/N \gtrsim 20$  a 5000 Å. Los espectros individuales son extraídos en el rango 4800 – 5800 Å, que abarca varias líneas de absorción típicas en galaxias elípticas. La velocidad en la línea de la visual ( $V_{LOS}$ ) y la dispersión de velocidades ( $\sigma_{LOS}$ ) son medidas mediante el algoritmo pPXF (Cappellari & Emsellem, 2004), tomando a los espectros sintéticos de los modelos MILES (Vazdekis et al., 2010) como plantilla de comparación. Los resultados son expuestos en la Fig. 1. En estudios previos se indica que la galaxia se comporta como un rotador rápido en sus regiones internas (Coccatto et al., 2009), por lo que en el presente trabajo sólo se tienen en cuenta las mediciones que presentan distancia galac-

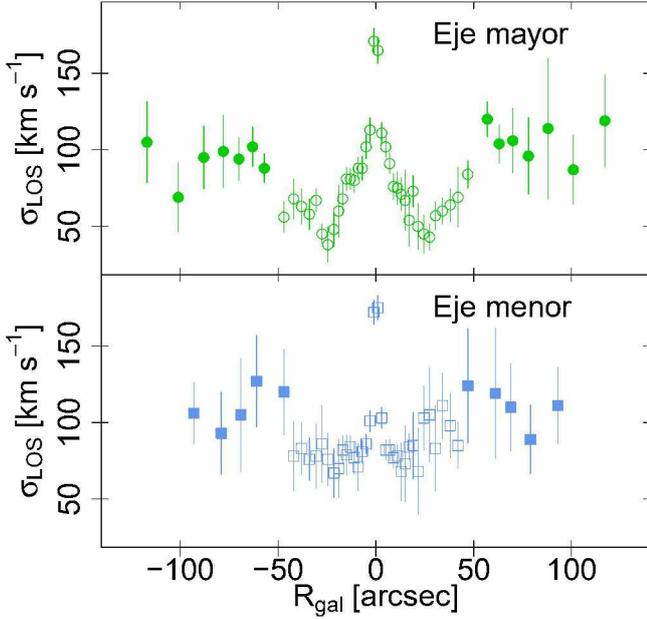


Figura 1:  $\sigma_{V,LOS}$  versus  $R_{gal}$  de la componente estelar, medida a partir de las observaciones de Gemini/GMOS en la dirección del eje mayor (panel superior) y eje menor (panel inferior). Los símbolos llenos representan los datos que son tenidos en cuenta en el análisis posterior.

tocéntrica  $\gtrsim 60$  arcsec (símbolos llenos en ambos paneles de la Fig. 1).

Estas observaciones son complementadas con catálogos disponibles en la literatura para diversos trazadores del halo, como CGs (Pota et al., 2013) y PNe Coccatto et al. (2009), que permiten extender el alcance del análisis. En el caso de las PNe, en el estudio de Coccatto et al. (2009) se observa que por debajo de distancias galactocéntricas ( $R_{gal}$ ) de 2 arcmin hay evidencia de rotación. Misma situación se detecta en Pota et al. (2013) para los CGs rojos, por lo que en ambos casos se descartan los objetos por debajo de este valor. Además se rechazan iterativamente aquellos objetos cuya  $V_{LOS}$  se diferencia de la media de su población en más de  $3\sigma_{LOS}$ . En la Fig. 2 se grafican, para las muestras de CGs y PNe utilizadas en el procedimiento,  $V_{LOS}$  en función de  $R_{gal}$ . La línea a trazos representa la velocidad sistémica de NGC 3377,  $690 \text{ km s}^{-1}$  (Cappellari et al., 2011)

### 3. Procedimiento

A continuación se resume el procedimiento aplicado para determinar el perfil de masa de la galaxia. Se supone que las distintas componentes de la galaxia actuando como trazadores, y dadas las restricciones radiales ya planteadas, no presentan rotación considerable y tienen simetría esférica. En esta situación, la ecuación de Jeans permite determinar los momentos de segundo y cuarto orden de la distribución de velocidad en la línea de la visual (Łokas, 2002; Mamon & Lokas, 2005).

En este trabajo se aplica análisis Bayesiano para determinar los parámetros del halo con mayor probabilidad de ocurrencia. La distribución de probabilidades *a priori* se obtiene a partir de la distribución de masas de

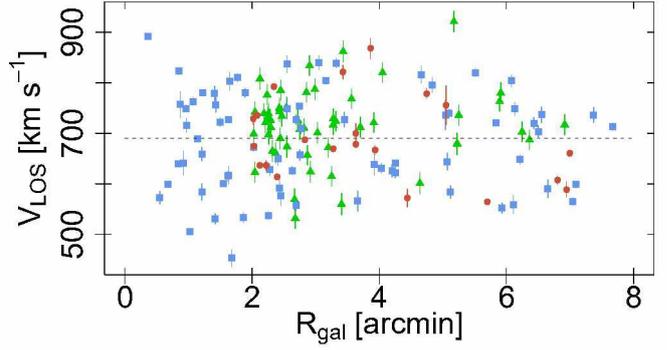


Figura 2:  $V_{LOS}$  versus  $R_{gal}$  para CGs azules (cuadrados) y rojos (círculos), y para PNe (triángulos). Estas dos últimas muestras están restringidas a objetos con  $R_{gal} > 2$  arcmin, por presencia de rotación.

los halos satélites presentes en la simulación de materia oscura MDPL2 (Klypin et al., 2016), parte del proyecto Multidark. Para esto se asignan luminosidades en el filtro  $r$  mediante un método de distribución de ocupación de halos (HOD, por sus siglas en inglés), suponiendo que cada halo aloja una galaxia, y diferenciando entre halos centrales y satélites. Para esto se adoptan las funciones de luminosidad derivadas por Lan et al. (2016), agregando una dispersión intrínseca en la relación masa estelar contra masa del halo según Girelli et al. (2020). Entonces, se eligen aquellos halos a los que se les asignaron luminosidades compatibles con aquella de NGC 3377, teniendo en cuenta las incertezas en su magnitud aparente y distancia. A partir de los halos seleccionados se construye una distribución de masas viriales, la cual es usada para derivar la distribución *a priori* para los parámetros del perfil NFW (Navarro et al., 1997),  $r_s$  y  $c_{vir}$ . Como restricción adicional, se adopta la masa calculada hasta el radio efectivo por Cappellari et al. (2013) mediante observaciones IFU y Jeans asimétrico. Estas dos condiciones resultan en la distribución *a priori* que se utiliza en el marco del análisis Bayesiano a partir de las poblaciones de trazadores.

El análisis de Jeans esférico se restringe a los casos de anisotropía constante. Para varias opciones de anisotropía se genera un grillado para los parámetros del perfil NFW ( $r_s$ ,  $c_{vir}$ ). En cada par de parámetros, el resultado surge de la probabilidad de obtener la muestra de trazadores observada, y pesada por la distribución *a priori*. En el caso de la componente estelar de la galaxia, se calcula a partir del estadístico  $\chi^2$ , según la diferencia entre las dispersiones de velocidades observadas y predichas:

$$\chi^2 = \sum_j \left( \frac{\sigma_{LOS,j}^{obs} - \sigma_{LOS,j}^{pred}}{e\sigma_{LOS,j}^{obs}} \right)^2 \quad (1)$$

Para CGs y PNe, la probabilidad surge de la convolución entre la distribución de la velocidad observada  $V_{LOS}$ , teniendo en cuenta su incerteza, y la distribución predicha para el halo NFW dado, expresada en término de polinomios de Gauss-Hermite (van der Marrel & Franx, 1993) según los momentos de segundo y

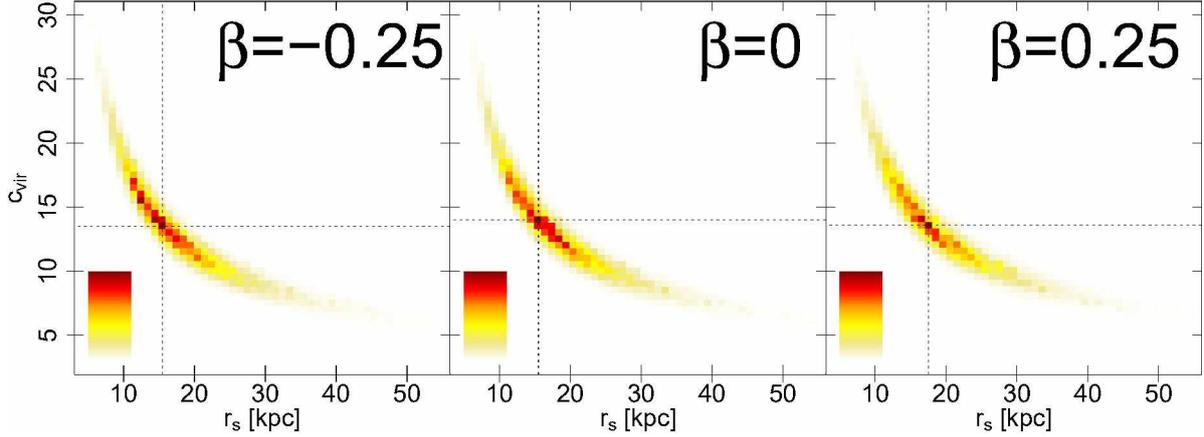


Figura 3: Mapa de color para perfiles NFW, representados mediante el radio característico ( $r_s$ ) y el parámetro de concentración ( $c_{\text{vir}}$ ), y tres valores de anisotropía. El gradiente de color representa pares de probabilidad creciente, de amarillo a rojo. Las líneas a trazos indican los valores con mayor probabilidad.

cuarto orden previamente indicados:

$$f(w) = g_{\text{NORM}} \left[ 1 + \frac{h_4}{\sqrt{24}} (4w^4 - 12w^2 + 3) \right] \quad (2)$$

con  $w = (V_{\text{LOS}} - V_0)/\sigma_{\text{LOS}}$ ,  $g_{\text{NORM}}$  la distribución normal centrada en  $V_0$  y de dispersión  $\sigma_{\text{LOS}}$ , y  $h_4$  relacionado con el momento de cuarto orden de la distribución de velocidad.

#### 4. Resultados

En su Apéndice, Coccato et al. (2009) muestra el parámetro  $h_4$  para los semiejes de NGC 3377, siendo consistentes con kurtosis nula a partir de una distancia galactocéntrica de 60 arcsec. Similares resultados surgen del proyecto SAURON para NGC 3377 (Cappellari et al., 2007). Además, en dicho trabajo la muestra de galaxias elípticas elongadas abarcan anisotropías entre  $\beta \approx -0.2$  y  $\beta \approx 0.2$ . En función de esto, se eligen valores de  $\beta$  intermedios para realizar el análisis, tal como se muestra en la Fig. 3. La escala de colores indica, de amarillo a rojo, pares de parámetros de probabilidad creciente. Las líneas a trazos señalan los pares de parámetros con mayor probabilidad,  $r_s = 16 - 18$  kpc,  $c_{\text{vir}} = 13 - 14$ . Esto resulta en masas viriales en el orden de  $M_{\text{vir}} \approx 4 \times 10^{11} M_{\odot}$ , y establecemos este valor como el cálculo preliminar de masa virial para NGC 3377. El mismo está en acuerdo con las estimaciones de masa que se podrían obtener a partir de la luminosidad en rayos X (Kim & Fabbiano, 2015) y la relación presentada por Forbes et al. (2017). El radio virial alcanza 220 – 240 kpc, del orden de la distancia respecto a las dos galaxias brillantes más cercanas, NGC 3379 y M 96, lo cual se condice con que NGC 3377 forme parte del grupo dominado por esta última.

*Agradecimientos:* Este trabajo fue realizado con fondos de Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la República Argentina, Agencia Nacional de Promoción Científica

y Tecnológica, y Universidad Nacional de La Plata (Argentina). Based on observations obtained at the international Gemini Observatory, a program of NSF's NOIRLab, which is managed by the Association of Universities for Research in Astronomy (AURA) under a cooperative agreement with the National Science Foundation on behalf of the Gemini Observatory partnership: the National Science Foundation (United States), National Research Council (Canada), Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (Chile), Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Argentina), Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (Brazil), and Korea Astronomy and Space Science Institute (Republic of Korea).

#### Referencias

- Cappellari M., Emsellem E., 2004, PASP, 116, 138  
 Cappellari M., et al., 2007, MNRAS, 379, 418  
 Cappellari M., et al., 2011, MNRAS, 413, 813  
 Cappellari M., et al., 2013, MNRAS, 432, 1709  
 Coccato L., et al., 2009, MNRAS, 394, 1249  
 de Vaucouleurs G., et al., 1991, *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies*, Springer, New York, NY (USA)  
 Drakos N.E., Taylor J.E., Benson A.J., 2020, MNRAS, 494, 378  
 Emsellem E., et al., 2011, MNRAS, 414, 888  
 Forbes D.A., et al., 2017, MNRAS, 464, L26  
 Girelli G., et al., 2020, A&A, 634, A135  
 Kim D.W., Fabbiano G., 2015, ApJ, 812, 127  
 Klypin A., et al., 2016, MNRAS, 457, 4340  
 Lan T.W., Ménard B., Mo H., 2016, MNRAS, 459, 3998  
 Lokas E.L., 2002, MNRAS, 333, 697  
 Mamon G.A., Lokas E.L., 2005, MNRAS, 363, 705  
 Müller O., Jerjen H., Binggeli B., 2018, A&A, 615, A105  
 Napolitano N.R., et al., 2011, MNRAS, 411, 2035  
 Navarro J.F., Frenk C.S., White S.D.M., 1997, ApJ, 490, 493  
 Pota V., et al., 2013, MNRAS, 428, 389  
 Richtler T., et al., 2015, A&A, 574, A21  
 Tully R.B., et al., 2013, AJ, 146, 86  
 van den Bosch F.C., et al., 2018, MNRAS, 474, 3043  
 van der Marel R.P., Franx M., 1993, ApJ, 407, 525  
 Vazdekis A., et al., 2010, MNRAS, 404, 1639  
 Wang J., et al., 2011, MNRAS, 413, 1373  
 White S.D.M., Frenk C.S., 1991, ApJ, 379, 52