

## PRESENTACION ORAL

### El origen de las galaxias esferoidales en simulaciones Cosmológicas

D.G. Algorry<sup>1,2</sup>, & M. G. Abadi<sup>1,2</sup>

(1) *Instituto de Astronomía Teórica y Experimental (CONICET-UNC)*

(2) *Observatorio Astronómico, Universidad Nacional de Córdoba*

**Abstract.** We use the GIMIC cosmological hydrodynamical simulations to perform a study of the properties of spheroidal galaxies formed without merger events. We select a sample of galaxies with stellar mass greater than  $10^{10} M_{\odot}$  and we classified them according to the degree of rotation support through the ratio of the rotational kinetic energy respect to the total at *redshift*  $z=0$ . Taken only those with  $\kappa_{rot} < 0.4$ , we focus on those with accreted mass fraction less than 20% to ensure that they are merger free. We found that these spheroidal galaxies have stellar mass  $M_{gal} < 10^{11} M_{\odot}$  and have an important barred component. Interestingly, we found that in many cases the simulated galaxies present two external rings around the bar being both coplanar and counter-rotating to each other

**Resumen.** Utilizando las simulaciones numéricas cosmológicas hidrodinámicas GIMIC realizamos un estudio de las propiedades de las galaxias esferoidales formadas sin eventos de fusión. Seleccionamos una muestra de galaxias con masa estelar mayor a  $10^{10} M_{\odot}$  y las clasificamos de acuerdo al grado de soporte rotacional a través del cociente en energía cinética de rotación respecto del total en corrimiento al rojo  $z=0$ . Tomando sólo aquellas con  $\kappa_{rot} < 0.4$ , nos focalizamos en aquellas galaxias cuya fracción de masa acreta es menor al 20% para asegurarnos que no han sufrido eventos de fusión mayores. Al analizar esta muestra encontramos que estas galaxias esferoidales poseen una masa estelar  $M_{gal} < 10^{11} M_{\odot}$  y poseen una componente barreada importante. Llamativamente, encontramos que en numerosos casos las galaxias simuladas presentan además dos anillos externos que rodean a la barra siendo ambos coplanares y contrarrotantes el uno respecto al otro.

## 1. Introducción

El modelo estandar de formación de galaxias esferoidales en el modelo jerárquico de estructuras  $\Lambda$ CDM establece que las mismas se forman a partir de eventos de fusión de protogalaxias. Sin embargo, estudios más recientes sugieren que si bien este sería el principal mecanismo de formación, existen galaxias esferoidales formadas a través de mecanismos alternativos tales como las inestabilidades de discos, la acreción de numerosos satélites poco masivos o la acreción desalineada

da de gas proveniente de diversos filamentos (Sales et al. 2012). En todos estos escenarios, los eventos de fusión mayor serían escasos o raros. En este trabajo estudiamos propiedades de galaxias esferoidales formadas sin eventos de fusiones mayores.

## 2. Simulaciones numéricas

Se utilizó la serie de simulaciones cosmológicas hidrodinámicas de alta resolución *Galaxies-Intergalactic Medium Interaction Calculation* (GIMIC, Crain et al. 2009). Las condiciones iniciales de estas simulaciones se generaron a partir de una región aproximadamente esférica de radio  $\sim 20 h^{-1}$  Mpc extraída de las simulaciones de N-cuerpos Millenium (Springel et al. 2005). Estas simulaciones siguen la evolución temporal de 5 regiones esféricas seleccionadas para muestrear regiones con densidades  $(-2, -1, 0, +1, +2)\sigma$  a *redshift*  $z = 1,5$ , donde  $\sigma$  es la fluctuación rms en masa medida en escalas de  $20 h^{-1}$  Mpc. De las 5 regiones existentes, este trabajo se focaliza en el análisis de la región  $0\sigma$  con el fin de estudiar una región de densidad típica del Universo.

Los parámetros cosmológicos adoptados en las simulaciones GIMIC son los mismos que los de las simulaciones Millenium, consistentes con las restricciones del satélite WMAP-1:  $\Omega_m = 0,25$ ;  $\Omega_\Lambda = 0,75$ ;  $\Omega_b = 0,045$ ;  $n_s = 1$ ;  $\sigma_8 = 0,9$ ;  $H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ;  $h = 0,73$ . Las masas de las partículas de la simulación son de:  $1,4 \times 10^6 h^{-1} M_\odot$  y  $6,6 \times 10^6 h^{-1} M_\odot$  para los bariones y la materia oscura, respectivamente.

Para identificar las galaxias utilizamos el algoritmo SUBFIND (Springel et al. 2001; Dolag et al. 2009) y seleccionamos sólo las galaxias centrales con masa estelar  $M \geq 10^{10} M_\odot$  a *redshift*  $z = 0$ . Este criterio identifica 119 galaxias centrales con más de  $10^4$  partículas estelares permitiendo una estimación razonable de sus propiedades intrínsecas.

## 3. Resultados

Adoptamos una medida de la importancia del soporte rotacional que poseen las partículas estelares para definir morfologías. Esta medida está basada en la fracción de energía cinética de rotación respecto de la energía cinética total que posee cada galaxia (Sales et al. 2012),  $\kappa_{rot} = \frac{K_{rot}}{K} = \frac{1}{K} \sum \frac{1}{2} m \left( \frac{j_z}{R} \right)^2$ . En esta ecuación,  $m$  es la masa,  $j_z$  es la componente perpendicular al disco del momento angular específico y  $R$  el radio cilíndrico. Con esta definición,  $\kappa_{rot} \sim 1$  corresponde a discos con estrellas en órbitas circulares y  $\kappa_{rot} \sim 0$  corresponde a sistemas soportados por dispersión de velocidades.

Elegimos una muestra de galaxias esferoidales formada por aquellos sistemas con  $\kappa_{rot} < 0,4$ . Este grupo constituye el 16 % de la muestra total, mientras que el 84 % restante está formado por galaxias disco o galaxias cuyo soporte rotacional o de dispersión son comparables.

El panel izquierdo de la Figura 1 muestra la fracción de masa estelar que fuera adquirida por la galaxia a través de eventos de acreción  $f_{acc}$  en función de  $\kappa_{rot}$ . Las galaxias disco ( $\kappa_{rot} \gtrsim 0,65$ ) poseen valores de  $f_{acc} < 0,2$ , lo que implica que la mayor cantidad de su masa estelar se originó in situ. Por otro lado, las

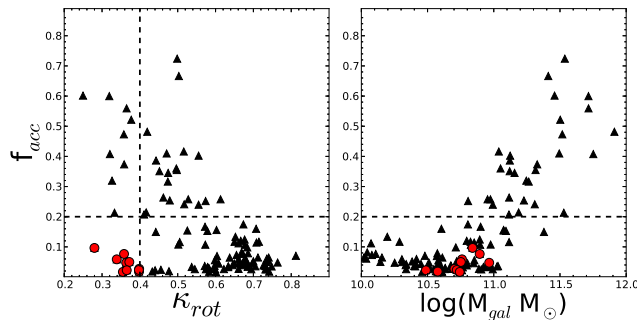


Figura 1. Panel izquierdo: Parámetro cinético morfológico  $\kappa_{rot}$  vs. fracción de masa estelar formada en otros sistemas  $f_{acc}$  de las galaxias de la muestra. Los puntos rojos representan las galaxias esferoidales definidas con  $\kappa_{rot} \leq 0,4$ . Panel derecho: Masa estelar de las galaxias  $M_{gal}$  vs.  $f_{acc}$  de las galaxias de la muestra.

galaxias esferoidales ( $\kappa_{rot} < 0,4$ ) presentan valores entre  $0,0 < f_{acc} < 0,6$ , lo que implica que existen galaxias esferoidales que han sufrido gran número de eventos de acreción en su evolución y otras que no. Con el fin de seleccionar galaxias esferoidales ( $\kappa_{rot} < 0,4$ ) sin eventos de fusión, seleccionamos aquellas que además poseen  $f_{acc} < 0,2$  (véase círculos rojos en la Figura 1). El panel derecho de la Figura 1 muestra cómo varía  $f_{acc}$  en función de la masa estelar de la galaxia  $M_{gal}$  donde se observa que las galaxias más masivas poseen un mayor porcentaje de masa estelar formada en otros sistemas, mientras que las galaxias esferoidales formadas sin eventos de fusión poseen una masa inferior a  $M_{gal} < 10^{11} M_{\odot}$ .

Definimos la circularidad  $\epsilon_j$  como el cociente del momento angular específico perpendicular al disco (alineado con el momento angular de la galaxia), respecto del momento angular de una órbita circular con la misma energía de ligadura,  $j_{circ}$  ( $\epsilon_j = j_z / j_{circ}(E)$ ). La circularidad puede tomar valores en el rango (-1,1), donde los valores extremos corresponden a órbitas circulares contra- y co-rotantes respectivamente, y  $\epsilon_j = 0$  corresponde a órbitas soportadas por dispersión de velocidades.

Para analizar en detalle la estructura dinámica interna de las galaxias seleccionadas, realizamos una descomposición de sus componentes estelares utilizando el método propuesto por Abadi et al. (2003). El panel izquierdo de la Figura 2 muestra el diagrama Energía  $E$  vs.  $\epsilon_j$  de las partículas estelares de una ejemplo de galaxia esferoidal formada sin eventos ( $\kappa_{rot}, f_{acc} = (0.35, 0.05)$ ). El panel central muestra la distribución espacial proyectada de frente de partículas seleccionadas según  $E < -1.2 \times 10^5$  (km/s)<sup>2</sup>. Se observa que las mismas forman una estructura barrada evidente. Esta barra rota lentamente con un patrón de velocidad de 1 vuelta por Giga-año. Además, en el panel izquierdo, se observan dos subestructuras adicionales, con energías  $E \sim -1.0 \times 10^5$  y circularidades  $\epsilon_j > 0,5$  (azul) y  $\epsilon_j < -0,5$  (rojo). El panel derecho muestra la distribución espacial proyectada de las mismas; es evidente la estructura de anillo que cada una de ellas posee y que una contrarota respecto de la otra (véase las flechas que indican los vectores velocidad respecto al centro de masa de la galaxia). Mientras que la barra posee aproximadamente el 85 % de la masa estelar total de la galaxia, los anillos se reparten prácticamente equitativamente el 15 % restante.

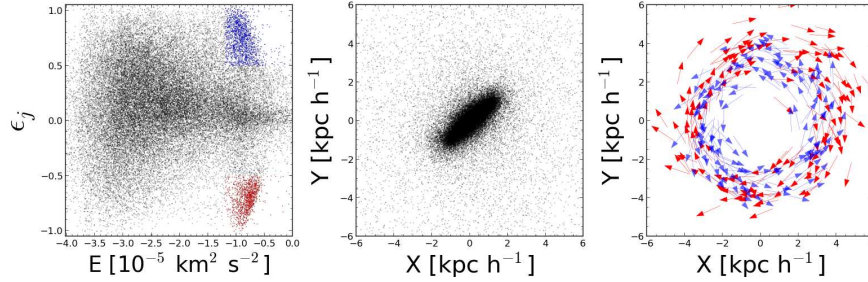


Figura 2. Panel izquierdo: Diagrama Energía vs. circularidad de una galaxia esferoidal formada sin eventos de fusión. Los puntos pintados de azul y rojo son dos sobredensidades de partículas que forman dos estructuras contrarrotantes una respecto de la otra. Panel central: Distribución espacial vista de frente de la galaxia. Panel derecho: Distribución espacial vista de frente de las partículas pintadas de azul y rojo en el panel izquierdo. Las flechas indican el sentido de la velocidad de cada partícula.

El análisis de las edades estelares de estas componentes indica que la barra esta formada por estrellas más viejas con edades  $t_{form} \sim 7$  Giga-años, al igual que el anillo corotante, mientras que el contrarrotante es más joven con edades  $t_{form} \sim 3$  Giga-años. Un análisis similar de las partículas gaseosas indica que el gas está siendo acretao en la estructura de anillo contrarrotante. De las 10 galaxias seleccionadas de las muestra, 7 poseen barras internas con al menos un anillo rotante y poco masivo en la parte externa y 4 de ellas con otro anillo contrarrotante.

Un análisis de la evolución de las propiedades rotacionales de la galaxia indica que estas galaxias fueron discos soportados por rotación a *redshift*  $z \sim 1$ , antes de convertirse en barras no rotantes. Además, estas galaxias no tuvieron interacción alguna con satélites de masa considerable y no han acretao gas en forma considerable en los últimos 7 Giga-años. Por lo tanto, la pérdida de momento angular de estas galaxias se debería a la interacción de las estrellas con el halo de materia oscura o sería producido por el desalineamiento entre el momento angular de la galaxia con el torque que generan los filamentos a lo largo de la evolución de las galaxias.

En una segunda etapa de este trabajo planeamos hacer una comparación directa de las propiedades de las galaxias analizadas con las propiedades observacionales de galaxias tempranas con parámetros morfológicos y de rotación similares extraídos del relevamiento Atlas 3D (Cappellari et al. 2011).

## Referencias

- Abadi M. G., et al., 2003, ApJ, 597, 21
- Cappellari M., et al., 2011, MNRAS, 413, 813
- Crain R. A., et al., 2009, MNRAS, 399, 1773
- Dolag K., et al., 2009, MNRAS, 399, 497
- Sales L. V., et al., 2012, MNRAS, 423, 1544
- Springel V., et al., 2005, Nat, 435, 629
- Springel V., et al., 2001, MNRAS, 328, 726