

# Formación de grupos compactos de galaxias en simulaciones cosmológicas hidrodinámicas

B.M. Celiz<sup>1</sup>, J.A. Benavides<sup>2,3</sup> & M.G. Abadi<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, UNC, Argentina

<sup>2</sup> Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, CONICET-UNC, Argentina

<sup>3</sup> Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

Contacto / bruno.celiz@mi.unc.edu.ar

**Resumen** / Utilizando la simulación cosmológica hidrodinámica TNG 100-1 estudiamos el proceso de formación de grupos compactos de galaxias dentro del modelo cosmológico  $\Lambda$ CDM. Basados en resultados observacionales, identificamos como grupos compactos a corrimiento al rojo  $z = 0$  a aquellos sistemas conformados por galaxias que pertenecen a un mismo grupo, con masas estelares similar a la más masiva y con brillo superficial  $\bar{\mu}_r < 26.33 \text{ mag arcsec}^{-2}$ . Seguimos la evolución temporal inversa de estos grupos desde  $z = 0$  hasta  $z = 1$  y encontramos que la mayoría de ellos cumplen los criterios de compacticidad sólo en los últimos 2 Gyrs de la evolución cósmica. Este resultado apunta a que un grupo compacto es una configuración transitoria de un grupo de galaxias cuyos miembros, independientemente de la multiplicidad en la que formaron al grupo, se encuentran lo suficientemente cerca para cumplir los criterios de identificación.

**Abstract** / Using the cosmological hydrodynamic simulation TNG 100-1 we studied the formation process of compact groups of galaxies in the cosmological model  $\Lambda$ CDM. Based on the observational results, we identified as compact groups at redshift  $z = 0$  those systems conformed by galaxies that belong to the same group, with stellar masses similar to the most massive and with surface brightness  $\bar{\mu}_r < 26.33 \text{ mag arcsec}^{-2}$ . Then, we follow the inverse temporal evolution of these groups from  $z = 0$  to  $z = 1$  and we found that the majority of them were compact only in the last 2 Gyrs of cosmic evolution. This result shows that a compact group is a transient configuration of a galaxy group which members, independently of the multiplicity of accretion to the group, are close enough to fulfill the identification criteria.

**Keywords** / galaxies: groups: general — galaxies: kinematics and dynamics

## 1. Introducción

Un grupo compacto de galaxias (GC) es una agrupación aislada de pocas galaxias ( $N \geq 4$ ) que se encuentran muy próximas entre sí, con radios proyectados de hasta 200 kpc (McConnachie et al., 2009). Esto los convierte en sistemas extremadamente densos, ideales para estudiar los efectos de las interacciones entre galaxias y su evolución a lo largo del tiempo.

Si bien los primeros GCs identificados datan desde hace más de 100 años (véase Stephan 1877), probablemente el catálogo más famoso sea el de “Grupos Compactos de Hickson” (Hickson, 1982), al ser uno de los primeros autores en definir cuantitativamente criterios para identificar estas agrupaciones. Los requisitos enunciados en el trabajo original de Hickson para identificar los grupos de su catálogo son:

- $N \geq 4$  (Población: cantidad de galaxias con brillo similar).
- $\Delta m \leq 3$  (Brillo similar: sólo se consideran aquellas galaxias con diferencia de magnitudes no mayor a 3 de la más brillante.)
- $\Theta_N > 3 \cdot \Theta_G$  (Aislamiento: que no haya galaxias de brillo similar dentro de 3 veces el tamaño angular del grupo).
- $\mu_G < 26 \text{ mag arcsec}^{-2}$  (Compacticidad: límite de

densidad de brillo superficial del grupo, calculado según Ec. 1).

$$\mu_G = -2.5 \log \left( \frac{\sum_{i=1}^N 10^{-0.4m_i}}{\pi \Theta_G^2} \right). \quad (1)$$

Uno de los problemas de utilizar únicamente estos criterios es que pueden estarse considerando miembros que no tengan velocidades a lo largo de la línea de la visual similares a las demás galaxias del grupo (Hickson et al., 1992). Es decir, que no estén interactuando entre sí. Entonces, en trabajos posteriores que han estudiado GCs (véase por ejemplo McConnachie et al. 2009; Sohn et al. 2015; Díaz-Giménez et al. 2018; Hartsuiker & Ploekinger 2020) se añade un nuevo criterio que deben cumplir las galaxias para formar un GC:

- $v_{LOS} \in (\bar{v}_{LOS} \pm 1000) \text{ km/s}$  (Velocidad concordante: las galaxias miembro deben tener velocidades a lo largo de la línea de la visual similar al promedio del grupo).

Aún así, diversos autores que han identificado GCs con estos criterios en simulaciones numéricas (véase por ejemplo McConnachie et al. 2008; Díaz-Giménez & Mamon 2010; Díaz-Giménez et al. 2020; Hartsuiker & Ploekinger 2020) reportan que entre un 20% y 80% de GCs no son físicamente compactos (según como se

defina): cumplen el criterio de compacticidad sólo por efectos de proyección.

En este trabajo nos proponemos estudiar la formación y evolución temporal de los grupos físicamente compactos de galaxias. Para ello, seguimos hasta corrimiento al rojo  $z = 1$  la trayectoria de cada galaxia que forme un GC a  $z = 0$  para reconstruir la historia de ensamblaje de estas agrupaciones. Para cuantificar el grado de compacticidad de un grupo sin estar sesgados por efectos de proyección utilizamos el brillo superficial  $\bar{\mu}_r$  del grupo promediado en las 3 proyecciones ortogonales ( $XY$ ,  $XZ$ ,  $YZ$ ).

Dado que requerimos las posiciones 3-dimensionales, la luminosidad y la masa de galaxias a lo largo del tiempo, utilizaremos los datos disponibles de la simulación cosmológica hidrodinámica TNG100-1 (Nelson et al., 2019), que es la realización de todo el conjunto de simulaciones *IllustrisTNG\** de volumen  $110.7^3 \text{Mpc}^3$  con mayor resolución disponible. El código AREPO (Springel, 2010) es empleado para evolucionar un universo de cosmología  $\Lambda\text{CDM}$  desde  $z \approx 20$  hasta  $z = 0$ , constituido por partículas de materia oscura y bariónica de masas  $m_{\text{DM}} = 7.5 \times 10^6 M_\odot$  y  $m_{\text{barion}} = 1.4 \times 10^6 M_\odot$  (respectivamente), teniendo en cuenta efectos de evolución estelar como realimentación por vientos estelares, enfriamiento por radiación, formación de agujeros negros supermasivos, entre otros.

## 2. Muestra

Utilizando los catálogos de galaxias y grupos de galaxias provistos por la simulación TNG100-1, a partir de un algoritmo *Friends-of-Friends* (FoF) (Davis et al., 1985) para los grupos de galaxias y un identificador *Subfind* (Springel, 2010) para los subhalos, identificamos grupos físicamente compactos al pedir los siguientes criterios:

- $M_* > 10^9 M_\odot$  (Corte en masa estelar: sólo consideramos galaxias bien resueltas. Es decir, con más de 1000 partículas estelares).
- Mismo grupo FoF (Aislamiento: todas las galaxias deben estar asignadas a un mismo grupo FoF de TNG 100-1).
- $N \geq 4$  (Población: cantidad de galaxias con masa estelar similar).
- $M_{*,i} > M_{*,\text{max}}/10$  (Masa estelar similar: sólo consideramos aquellas galaxias con masa estelar mayor al 10% de la más masiva, dentro del mismo grupo FoF.)
- $\bar{\mu}_r < 26.33 \text{ mag arcsec}^{-2}$  (Compacticidad: límite de brillo superficial del grupo en la banda  $r$  del SDSS (*Sloan Digital Sky Survey\*\**, York et al. 2000) sugerido por Taverna et al. (2016), promediado sobre las proyecciones  $XY$ ,  $XZ$ ,  $YZ$ ).

## 3. Resultados

En la Fig. 1 mostramos la compacticidad de los grupos de galaxias a  $z = 0$  en función de la suma de las masas estelares de las galaxias miembro de cada grupo. El

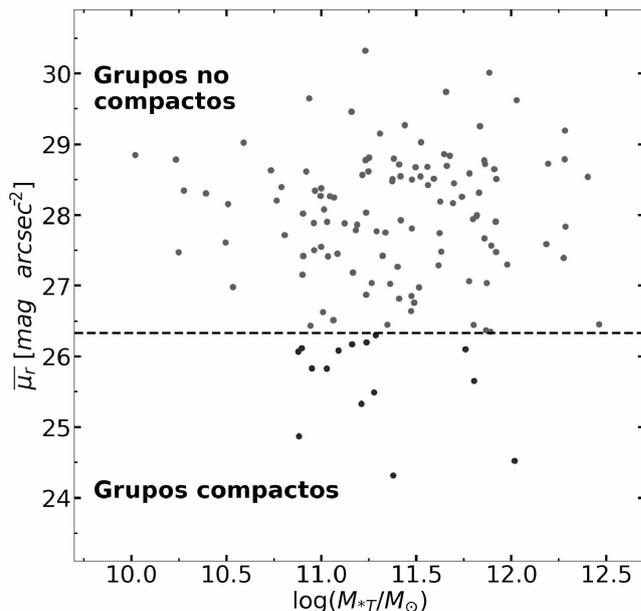


Figura 1: Brillo superficial de grupos FoF con 4 o más galaxias de masas similares, en función de la masa estelar del grupo. En línea discontinua negra el valor límite de compacticidad elegido en los criterios de GC de este trabajo ( $\bar{\mu}_r = 26.33 \text{ mag arcsec}^{-2}$ ). En puntos azules, los grupos que cumplen el criterio de compacticidad, es decir, los que identificamos como GC. En puntos rojos, los grupos de galaxias que no cumplen el criterio de compacticidad.

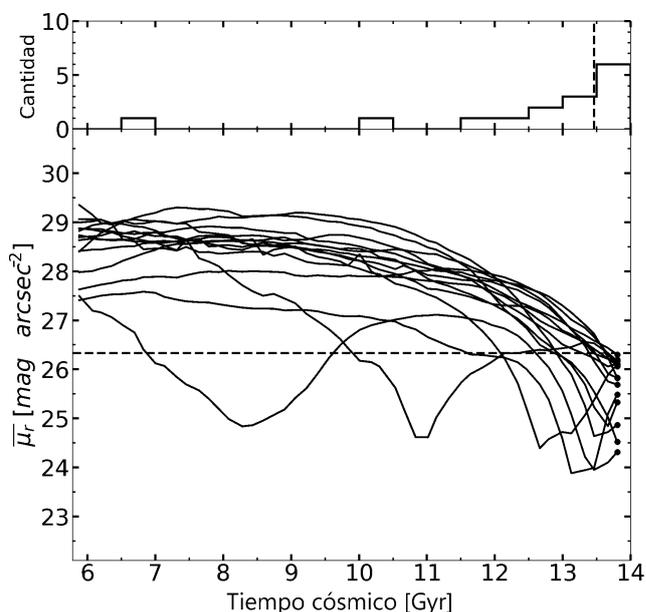


Figura 2: Curvas de compacticidad de cada GC identificado a  $z = 0$ , hasta  $z = 1$ . La línea discontinua horizontal indica el límite de densidad de brillo superficial elegido en los criterios de GC de este trabajo ( $\bar{\mu}_r = 26.33 \text{ mag arcsec}^{-2}$ ). El histograma superior indica en qué instante de tiempo cósmico cada grupo cruza por primera vez el límite de compacticidad, y en línea discontinua vertical se muestra la mediana de estos “tiempos de compactificación”.

\*<https://www.tng-project.org/>

\*\*<https://skyserver.sdss.org/dr18/>

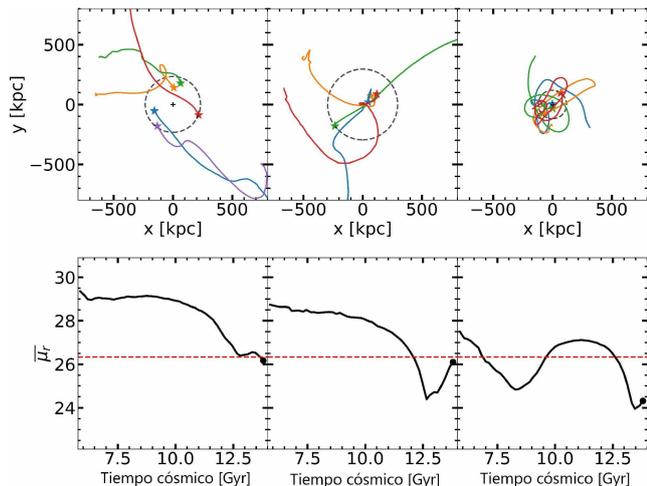


Figura 3: *Panel superior:* Trayectorias de las galaxias de 3 GCs diferentes en el plano  $XY$ . Se muestran regiones cuadradas de 1.6 Mpc físicos de lado, centradas en el centro geométrico del grupo. *Panel inferior:* Curvas de compacticidad de los 3 mismos GCs del panel superior. *Panel izquierdo:* Grupo FoF 243 (encuentro reciente entre pares de galaxias). *Panel central:* Grupo FoF 57 (galaxias que provienen desde diferentes lugares que ya atravesaron su configuración de máxima compacticidad). *Panel derecho:* Grupo FoF 142 (4 galaxias que han estado interactuando entre sí desde hace más de 2 Gyrs).

estimador de compacticidad  $\bar{\mu}_r$  de cada grupo fue calculado a partir de la magnitud absoluta en la banda  $r$  y de la posición 3-dimensional de las galaxias dentro de la simulación, para medir la magnitud aparente y el radio proyectado del grupo (círculo de menor tamaño que encierra a todos los miembros, centrado en el centro geométrico) en cada proyección. Luego, calculamos  $\mu_{XY}$ ,  $\mu_{XZ}$  y  $\mu_{YZ}$  según la Ec. 1 y los promediamos, asignando un único un valor de compacticidad a cada grupo.

Encontramos en total 15 GC, formados por 4 galaxias (12 GCs), por 5 (2 GCs) o por 7 (1 GC), con dispersión de velocidades en el rango de  $150 \text{ km s}^{-1}$  a  $700 \text{ km s}^{-1}$  y con tamaños (promedio de radios proyectados en las 3 proyecciones) desde 80 kpc hasta 320 kpc, resultados comparables a los observacionales (por ejemplo McConnachie et al. 2009 o Sohn et al. 2015) y a los obtenidos de catálogos simulados (por ejemplo McConnachie et al. 2008 o Díaz-Giménez et al. 2020). Al analizar la evolución temporal de la compacticidad los grupos (Fig. 2), observamos que 12 de 15 (80% de la muestra) cumplen todos los criterios de identificación sólo en los últimos 2 Gyrs de tiempo cósmico.

Por otro lado, del análisis de las trayectorias de las galaxias miembro que forman un GC, vemos que no hay un único mecanismo de formación de estas agrupaciones: Por ejemplo, pueden ensamblarse a partir de un encuentro reciente de 2 pares de galaxias (panel supe-

rior izquierdo, Fig. 3), del encuentro cercano de galaxias que provienen desde diferentes puntos del espacio (panel superior central, Fig. 3), o de galaxias que estuvieron interactuando entre sí durante mucho tiempo (panel superior derecho, Fig. 3), entre otras posibilidades.

## 4. Discusión

Los criterios utilizados en este trabajo nos permiten identificar y seguir la evolución de grupos físicamente compactos.

El 80% de los GCs identificados a  $z = 0$  cumplen el criterio de compacticidad sólo desde hace 2 Gyrs o menos. Las curvas de compacticidad de los 3 ejemplos mostrados en la Fig. 3 muestran que un GC es en realidad un grupo de 4 o más galaxias de masa estelar similar que está atravesando brevemente una configuración que le permite cumplir los criterios de compacticidad cuando sus miembros se encuentran lo suficientemente cerca. Estas configuraciones transitorias ocurren cuando: i) Diferentes galaxias se encuentran por primera vez (caso del Grupo 243, panel izquierdo de la Fig. 3). ii) Galaxias que tuvieron un primer encuentro cercano en el pasado (vemos un mínimo en su curva de compacticidad) y sus miembros se están alejando entre sí a  $z = 0$  (caso del Grupo 57, panel central de la Fig. 3). iii) Galaxias que tuvieron su primer encuentro cercano, se alejaron lo suficiente para dejar de cumplir el criterio de compacticidad pero a  $z = 0$  están atravesando un nuevo encuentro cercano tal que el grupo vuelve a cumplir los criterios de compacticidad (caso del Grupo 142, panel derecho de la Fig. 3).

Los resultados obtenidos evidencian que los GCs son sólo el extremo más compacto de la población de grupos de galaxias (Fig. 1). Al pedir que se cumplan los criterios enumerados en la Sec. 2 en TNG100-1 logramos identificar configuraciones compactas de grupos de galaxias con historias de formación muy variadas.

## Referencias

- Davis M., et al., 1985, ApJ, 292, 371  
 Díaz-Giménez E., Mamon G.A., 2010, MNRAS, 409, 1227  
 Díaz-Giménez E., Zandivarez A., Taverna A., 2018, A&A, 618, A157  
 Díaz-Giménez E., et al., 2020, MNRAS, 492, 2588  
 Hartsuiker L., Ploekinger S., 2020, MNRAS, 491, L66  
 Hickson P., 1982, ApJ, 255, 382  
 Hickson P., et al., 1992, ApJ, 399, 353  
 McConnachie A.W., Ellison S.L., Patton D.R., 2008, MNRAS, 387, 1281  
 McConnachie A.W., et al., 2009, MNRAS, 395, 255  
 Nelson D., et al., 2019, Comput. Astrophys. Cosmol, 6, 2  
 Sohn J., et al., 2015, J. Korean Astron. Soc., 48, 381  
 Springel V., 2010, MNRAS, 401, 791  
 Stephan M., 1877, MNRAS, 37, 334  
 Taverna A., et al., 2016, MNRAS, 461, 1539  
 York D.G., et al., 2000, AJ, 120, 1579