



Grupos de galaxias enanas en un Universo Λ CDM

C.Y. Yaryura¹, M.G. Abadi^{1,2}, A.N. Ruiz^{1,2} & S.A. Cora^{3,4}

¹ Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, CONICET-UNC, Argentina

² Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

³ Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

⁴ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

Contacto / yamila.yaryura@unc.edu.ar

Resumen / Resultados observacionales recientes reportan la identificación de siete grupos de galaxias enanas, siendo la mayor cantidad de sistemas de estas características hasta el momento. Estudiamos la capacidad del modelo cosmológico Λ CDM para reproducir los resultados observacionales de estos sistemas. Utilizamos la simulación cosmológica SMALL MULTIDARK PLANCK acoplada al modelo semianalítico de formación de galaxias SAG, y utilizamos el algoritmo de percolación FRIENDS OF FRIENDS (FOF) para identificar sistemas de galaxias. Seleccionamos los grupos compuestos sólo por galaxias enanas y estudiamos sus principales propiedades dinámicas, estimando masa, tamaño y dispersión de velocidades. Nuestros resultados sugieren que el modelo semianalítico SAG acoplado a una simulación cosmológica de alta resolución es capaz de identificar grupos de galaxias enanas con tamaños comparables a los grupos observados. Sin embargo, nuestros grupos presentan dispersiones de velocidad significativamente menores a las presentadas por los grupos observados, por lo que las masas estimadas de estos últimos son significativamente mayores. Si estos resultados se confirmaran para futuras muestras más numerosas de grupos de galaxias enanas, podrían representar un potencial problema para el modelo Λ CDM.

Abstract / Seven groups of dwarf galaxies were recently reported by observational results, being the largest number of systems of these characteristics so far. Motivated by these observational results, we study the ability of the cosmological model Λ CDM to reproduce them. We use the Small MULTIDARK PLANCK COSMOLOGICAL SIMULATION coupled to the semi-analytical model of galaxy formation SAG. We also use the percolating FRIENDS OF FRIENDS algorithm (FOF) to identify galaxy systems. Then, we select groups composed only by dwarf galaxies and study their main dynamical properties, estimating mass, size and velocity dispersion. Our results suggest that the semi-analytical model editsAG coupled to a high-resolution cosmological simulation can naturally reproduce the existence and sizes of dwarf galaxies groups without much difficulty. However, velocity dispersions of our groups are significantly lower than those presented by observed groups. Given that the mass is proportional to the velocity dispersion, the estimated masses of the observed groups are significantly higher. These results could represent a potential problem for the Λ CDM model if they are confirmed for future more numerous samples of dwarf galaxies groups.

Keywords / galaxies: dwarf — galaxies: groups: general

1. Introducción

El paradigma actual de la formación de estructuras en el universo es el modelo cosmológico de materia oscura fría con constante cosmológica Λ CDM. El mayor desafío para este modelo es reproducir los resultados observacionales en escalas pequeñas, tales como las galaxias y los sistemas en que éstas se asocian. Este modelo cosmológico corresponde a un modelo jerárquico, en donde las galaxias se forman por la fusión de galaxias menos masivas. Este proceso debería ocurrir, tanto para la formación de galaxias masivas como para las galaxias enanas, por lo que los actuales sistemas formados sólo por galaxias enanas podrían fusionarse para dar origen a galaxias individuales con masa intermedia.

Los sistemas formados sólo por galaxias enanas son de fundamental importancia para validar el proceso jerárquico de formación de galaxias. Sin embargo, poco se sabe acerca de los sistemas de galaxias enanas, sobre sus propiedades y sobre su rol en la evolución de galaxias de baja masa. En Yaryura et al. (2020) estu-

diamos sistemas extendidos compuestos exclusivamente por galaxias enanas, denominados “asociaciones de galaxias enanas”, en el modelo cosmológico Λ CDM. Estudiamos la factibilidad de encontrar dichas asociaciones en una simulación cosmológica de materia oscura acoplada a un modelo semianalítico de formación de galaxias, y analizamos la habilidad de dicho modelo para reproducir las propiedades observacionales de las asociaciones presentadas por Tully et al. (2006). Nuestros sistemas tienen tamaños característicos $\sim 0.2 \text{ Mpc } h^{-1}$, dispersión de velocidades del orden de $\sim 30 \text{ km s}^{-1}$ y masa total estimada $\sim 10^{11} \text{ M}_{\odot} h^{-1}$, valores consistentes con resultados observacionales. Esto indica que el modelo Λ CDM es capaz de reproducir la existencia y las propiedades de las asociaciones de galaxias enanas observadas sin necesidad de ningún ajuste adicional. Por otro lado, Stierwalt et al. (2017) reporta siete “grupos de galaxias enanas”, identificadas a partir del catálogo espectroscópico SLOAN DIGITAL SURVEY (SDSS), y sus propiedades dinámicas son significativamente dife-

rentes a las propiedades de las “asociaciones de galaxias enanas” de Tully et al. (2006). Motivados por los resultados presentados por Stierwalt et al. (2017) y como continuación de Yaryura et al. (2020), el objetivo principal de este proyecto es estudiar la habilidad del modelo cosmológico Λ CDM para reproducir los resultados observacionales de los grupos de galaxias enanas presentados por Stierwalt et al. (2017).

2. Metodología

Para el estudio teórico de los grupos de galaxias enanas, combinamos una simulación cosmológica de materia oscura con un modelo semianalítico de formación de galaxias SAG (Cora et al., 2018), el cual incluye procesos físicos que determinan las propiedades de las diferentes componentes bariónicas de las galaxias (halo de gas caliente, disco de gas frío y disco y bulbo estelar). Tales procesos comprenden enfriamiento de gas caliente, formación estelar a partir del reservorio de gas frío, retroalimentación energética por supernovas y núcleos galácticos activos, enriquecimiento químico, y efectos de fusiones y del ambiente en el que se encuentran las galaxias.

Utilizamos la simulación SMALL MULTIDARK PLANCK (SMDPL) basada en la cosmología obtenida por la colaboración Planck (Planck Collaboration, 2016), la cual sigue la evolución de 3840^3 partículas dentro de un cubo de $400 \text{ Mpc } h^{-1}$ de lado. La resolución de masa por partícula, igual a $9.63 \times 10^7 \text{ M}_\odot h^{-1}$, es suficiente para resolver correctamente los halos de galaxias enanas. Los parámetros cosmológicos utilizados en SMDPL son: $\Omega_m = 0.307115$, $\Omega_\Lambda = 0.692885$, $h = 0.6777$, $\sigma_8 = 0.8228$ y $n_s = 0.96$, donde Ω_m es la densidad total de materia (masa bariónica + materia oscura), Ω_Λ es la densidad de energía oscura, h es la constante de Hubble a redshift cero en unidades de $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc } h^{-1}$, σ_8 es la amplitud de las fluctuaciones lineales de masa en esferas de $8 \text{ Mpc } h^{-1}$ a $z = 0$, y n_s es el índice espectral del espectro de potencia primordial.

A partir de la muestra de galaxias semianalíticas, identificamos sistemas de galaxias con al menos tres miembros, usando el algoritmo de percolación FOF (FRIENDS-OF-FRIENDS), con una longitud de percolación igual a $b = 0.04 \text{ Mpc } h^{-1}$. Este valor fue calibrado para reproducir los tamaños característicos de la muestra observacional de los grupos de galaxias enanas presentados por Stierwalt et al. (2017). Luego, removimos todos aquellos sistemas que tienen al menos una galaxia más masiva que una dada masa estelar límite, M_{max} , considerando tres cortes diferentes: $\log_{10}(M_{\text{max}}[\text{M}_\odot h^{-1}]) = 8.5, 9.0$ y 9.5 . A partir de estos cortes en masa estelar definimos tres muestras diferentes de grupos de galaxias enanas, para así analizar sus principales propiedades.

La Figura 1 muestra la distribución espacial proyectada de nuestras galaxias semianalíticas (puntos grises pequeños) en una rebanada de $10 \text{ Mpc } h^{-1}$ de profundidad y la posición de los sistemas identificados para nuestras muestras (círculos vacíos). El radio de los círculos indica $100 R_p$, donde R_p es la separación radial proyectada de cada uno de los miembros del grupo al cen-

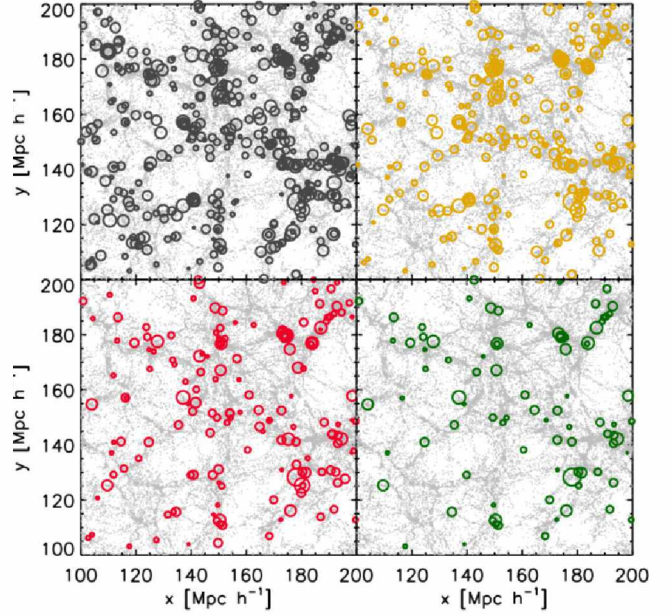


Figura 1: Distribución espacial proyectada de nuestras galaxias semianalíticas (puntos grises pequeños) en un corte de $10 \text{ Mpc } h^{-1}$ de profundidad y la posición de los sistemas identificados para nuestras muestras (círculos vacíos). El radio de los círculos indica $100 R_p$ (ver texto). Cada panel corresponde a un corte en masa estelar. *Panel superior izquierdo*: muestra completa de grupos, es decir, sin aplicar ningún corte en masa estelar: $\log_{10}(M_{\text{max}}[\text{M}_\odot h^{-1}]) = 12.9$ (círculos grises). *Panel superior derecho*: $\log_{10}(M_{\text{max}}[\text{M}_\odot h^{-1}]) = 9.5$ (círculos amarillos). *Panel inferior izquierdo*: $\log_{10}(M_{\text{max}}[\text{M}_\odot h^{-1}]) = 9.0$ (círculos rojos). *Panel inferior derecho*: $\log_{10}(M_{\text{max}}[\text{M}_\odot h^{-1}]) = 8.5$ (círculos verdes).

troide del grupo promediada entre todos los miembros del grupo, lo cual representa una estima del tamaño característico de los grupos. Cada panel corresponde a un corte en masa estelar, tal como indica la figura.

3. Resultados

Una vez identificados los grupos de galaxias enanas, estudiamos sus principales propiedades dinámicas. Siguiendo el trabajo de Stierwalt et al. (2017) estimamos un indicador del tamaño de los grupos calculando la distancia entre un miembro del grupo y el centroide del grupo promediada para todos los miembros del grupo (R_p), la dispersión de velocidad (σ) y la masa estimada (M_{est}). Dichas propiedades se definen con las siguientes ecuaciones:

$$R_p = 1/N \sum d_i,$$

$$\sigma = \sqrt{3} \times \sqrt{\langle v^2 \rangle - \langle v \rangle^2},$$

$$M_{\text{est}} = f_{pm}/[G(N - \alpha)] \sum R_{p,i} \Delta V_i^2,$$

donde d_i es la distancia entre un miembro del grupo y el centroide del grupo, v es la velocidad en la línea de la visual de cada galaxia para todos los miembros

del grupo, ΔV es la diferencia en la velocidad en la línea de la visual entre cada miembro del grupo y la velocidad media del grupo, y las sumas se realizan sobre todos los miembros del grupo. Los valores constantes utilizados son el número de miembros del grupo N , la constante de proporcionalidad $f_{pm} = 20/\pi$ que depende de la distribución de órbitas, la constante gravitacional G y $\alpha = 1.5$ tal como se adopta en la literatura (Heisler et al. (1985) y Tully (1987)).

La Figura 2 muestra las propiedades de los sistemas de galaxias en función del número de miembros por sistema, para cada una de las muestras (tal como se indica en la figura). Desde el panel superior al inferior, se muestra la cantidad de sistemas, la mediana de R_p , la mediana σ y la mediana de la M_{est} . Las barras verticales corresponden a errores de 1σ . Círculos llenos negros muestran los siete grupos de galaxias enanas presentados por Stierwalt et al. (2017). El valor de h que adoptan para estas observaciones es $h = 0.69$.

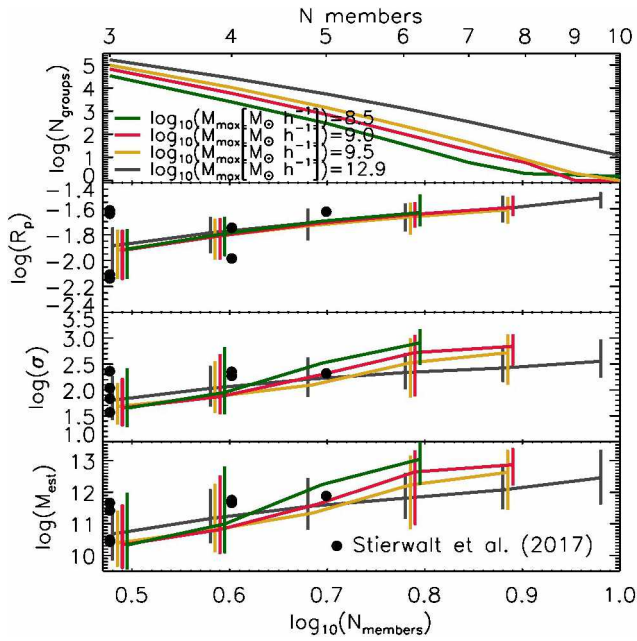


Figura 2: Propiedades de los sistemas de galaxias en función del número de miembros por sistema, para cada una de las muestras. Desde el panel superior al inferior, se muestra la cantidad de sistemas, la mediana de R_p [$Mpc h^{-1}$], la mediana de σ [kms^{-1}] y la mediana de M_{est} [$M_{\odot} h^{-1}$]. Las barras de error verticales corresponden a la incerteza 1σ . Los círculos llenos negros muestran los siete grupos de galaxias enanas presentados por Stierwalt et al. (2017).

Para analizar estas propiedades dinámicas de nuestros grupos de galaxias enanas, comparamos las relaciones de escalas entre ellas, considerando las tres muestras, y las comparamos con los resultados observacionales. La Figura 3 muestra las relaciones de escala entre el tamaño, la dispersión de velocidades y la masa para cada una de las muestras, tal como indica la figura.

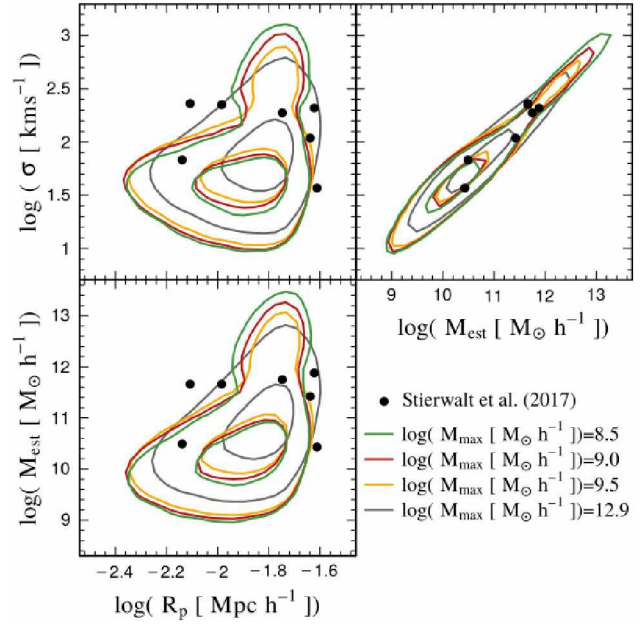


Figura 3: Relaciones de escala entre el tamaño, la dispersión de velocidades y la masa para cada una de las muestras, tal como se indica en la figura. Las líneas internas (externas) representan el contorno de nivel que encierra el 25 (75) % de cada muestra. Los puntos negros llenos muestran los siete grupos observados presentados por Stierwalt et al. (2017).

4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, podemos afirmar que el modelo semianalítico de formación de galaxias SAG acoplado a una simulación cosmológica de alta resolución es capaz de reproducir grupos de galaxias enanas con tamaños comparables a los grupos observados presentados por Stierwalt et al. (2017). Sin embargo, nuestros grupos presentan dispersiones de velocidades significativamente menores que los grupos observados. Dado que la masa estimada se calcula a partir de la dispersión de velocidades, nuestros grupos presentan masas estimadas menores que los grupos observados. Si bien en este trabajo comparamos nuestros resultados con los únicos siete grupos observados de galaxias enanas reportados hasta el momento, este análisis es muy importante en virtud de los futuros relevamientos de galaxias, los cuales prometen un mapa muy detallado del universo cercano, a partir del cual podremos estudiar sistemáticamente las galaxias enanas y los diferentes sistemas que ellas habitan.

Referencias

- Cora S.A., et al., 2018, MNRAS, 479, 2
 Heisler J., Tremaine S., Bahcall J.N., 1985, ApJ, 298, 8
 Planck Collaboration, 2016, A&A, 594, A13
 Stierwalt S., et al., 2017, Nat. Astron., 1, 0025
 Tully R.B., 1987, ApJ, 321, 280
 Tully R.B., et al., 2006, AJ, 132, 729
 Yaryura C.Y., et al., 2020, MNRAS