



Ensamblaje de cúmulos de galaxias por eventos de acreción de grupos de galaxias

J.A. Benavides^{1,2} & M.G. Abadi^{1,2}

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

² Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

Contacto / jose.astroph@gmail.com

Resumen / Analizamos la acreción de grupos de galaxias a cúmulos de galaxias con masa virial $M_{200} \sim 10^{14} M_{\odot}$ en el modelo Λ CDM utilizando la simulación hidrodinámica cosmológica Illustris. Encontramos que aproximadamente el $\sim 60\%$ de la población de galaxias a corrimiento al rojo $z = 0$, fueron acretadas en grupos y no individualmente desde el campo. La evolución de estos grupos dentro del cúmulo es rápida, en escalas de tiempo de 1 a 3 Gyr después de la caída la coherencia en el espacio de las fases (posiciones y velocidades) han sido borradas por el potencial gravitacional del cúmulo. Además, encontramos que los grupos son entornos propicios para que ocurran fusiones entre galaxias incluso luego de la acreción al cúmulo. Por cúmulo, identificamos un promedio de 17 ± 9 fusiones que se producen en grupos de galaxias durante la caída, de las cuales 7 ± 3 ocurren dentro del radio virial del cúmulo. El número de fusiones muestra una gran dispersión de un cúmulo a otro, llegando a 42 eventos de fusión en el cúmulo más masivo.

Abstract / We analyzed the accretion of galaxy groups into galaxy clusters with virial mass $M_{200} \sim 10^{14} M_{\odot}$ in the Λ CDM model using the Illustris cosmological hydrodynamic simulation. We found that approximately $\sim 60\%$ of the population of galaxies at redshift $z = 0$ were accreted in groups and not individually from the field. The evolution of these groups within the cluster is fast, on time scales from 1 to 3 Gyr after the fall the coherence in phases space (positions and velocities) have been erased by the gravitational potential of the cluster. Furthermore, we found that clusters are conducive environments for mergers to occur between galaxies even after accretion to the cluster. Per cluster, we identify an average of 17 ± 9 mergers that occur in groups of galaxies during the fall, of which 7 ± 3 occur within the virial radius of the cluster. The number of mergers shows a large dispersion from one cluster to another, reaching 42 merger events in the most massive cluster.

Keywords / galaxies: clusters — galaxies: groups — galaxies: interactions — galaxies: kinematics and dynamics

1. Introducción

Los cúmulos de galaxias son las estructuras virializadas más grandes en el Universo actual. El modelo cosmológico de materia oscura fría con constante cosmológica Λ CDM describe un proceso de formación jerárquico donde las estructuras más grandes se forman por procesos de acreción y eventualmente fusiones de sistemas menos masivos. Esto aplica tanto para objetos individuales como para agrupaciones de galaxias. Grupos (o remanentes de grupos) y otras subestructuras han sido detectados observacionalmente en el interior de cúmulos de galaxias a partir de (por ejemplo) información cinemática de las galaxias individuales (Conselice & Gallagher, 1998; Biviano et al., 2002; Lisker et al., 2018; Iodice et al., 2019).

Dadas las altas dispersiones de velocidades dentro de un cúmulo de galaxias, $\sigma \sim 10^3 \text{ km s}^{-1}$, la probabilidad de que estas agrupaciones en su interior se generen espontáneamente es muy baja. Por lo tanto, se ha asociado a estas galaxias con propiedades cinemáticas muy próximas entre sí como remanentes de grupos de galaxias que cayeron juntas al interior del cúmulo. Sin embargo, estas mediciones pueden ser susceptibles a errores (partiendo del hecho de querer hacer mediciones completas solo con

información en la línea de la visual), además de preguntas como ¿qué tanta información podemos recuperar de estos sistemas acretados a lo largo del tiempo?. En este trabajo presentamos resultados del estudio del proceso de ensamblaje de cúmulos de galaxias por la acreción de galaxias individuales y en grupos. Para esto utilizamos datos de las simulaciones cosmológicas hidrodinámicas de vanguardia de alta resolución Illustris-1. En la Sec. 2 presentamos algunos detalles de esta simulación y la selección de los datos para nuestro análisis. En la Sec. 3 analizamos algunos efectos del entorno del cúmulo sobre la estructura de los grupos acretados y resultados de la detección de eventos de fusiones a lo largo del tiempo de caída. Finalmente se presentan algunas conclusiones y referencias. Una descripción más detallada del trabajo es presentada en Benavides et al. (2020).

2. Simulación y Metodología

El proyecto Illustris consiste en un conjunto de simulaciones numéricas cosmológicas hidrodinámicas (Vogelsberger et al., 2014a,b), en una caja de 106 Mpc de lado y corridas con el código AREPO (Springel et al., 2001), con condiciones iniciales establecidas en $z = 127$ y parámetros cosmológicos consistentes con resultados

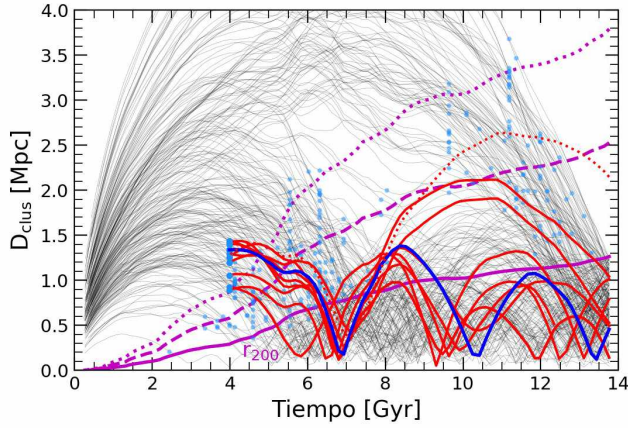


Figura 1: Distancias al centro del cúmulo N° 0 trazadas hacia atrás del tiempo para cada una de las galaxias dentro del radio virial a $z = 0$. Los puntos azules indican el tiempo en el cual caen al cúmulo en formación. Las curvas rojas corresponde al ejemplo de un grupo de galaxias que cayeron juntas y la curva azul a la galaxia central de este grupo acretado. La curva magenta continua indica el crecimiento del radio virial (r_{200}), las líneas a trazos y de puntos para $2r_{200}$ y $3r_{200}$ respectivamente.

del Wilkinson Microwave Anisotropy Probe WMAP9 (Hinshaw et al., 2013). La identificación de los halos y subhalos se hace a través de Friends-of-Friends (Davis et al., 1985) y SUBFIND (Springel et al., 2001); para el seguimiento de los halos a lo largo del tiempo se utilizó el SUBLINK merger trees (Rodríguez-Gómez et al., 2015). En nuestro caso utilizamos la simulación Illustris-1 que tiene una resolución en masa por partícula de $m_{\text{dm}} = 6.3 \times 10^6 M_{\odot}$, $m_{\text{gas}} = 1.3 \times 10^6 M_{\odot}$ y la longitud de ablandamiento para la interacción gravitacional es $\epsilon \sim 0.7$ kpc. La simulación incluye diez halos con $\log(M_{200}/M_{\odot}) > 14$.

Para el desarrollo de nuestro trabajo consideramos galaxias con una resolución confiable para subhalos con $m_{*} \geq 1.5 \times 10^8 M_{\odot}$ que son ~ 120 partículas estelares. Seleccionamos todas las galaxias dentro del radio virial a $z = 0$ y trazamos sus órbitas hacia atrás en el tiempo. Definimos el radio virial (r_{200}) como el radio de una esfera cuya densidad media es 200 veces la densidad crítica del Universo ($\rho_c = 3H^2/8\pi G$). Tomamos como tiempo de caída (conocido normalmente en la literatura como t_{infall}) al cúmulo el momento previo a que formaran parte del mismo halo, obteniendo valores de distancia que van entre 1 a 3 veces el radio virial (ver Fig. 1). Para cada una de las galaxias acretadas se revisa el número de miembros que hacen parte del grupo al momento de la caída y luego sus órbitas son trazadas nuevamente hacia adelante en el tiempo, esto nos permite incluir galaxias que: I) forman parte de la muestra pero quedan fuera del radio virial a $z = 0$, conocidas como galaxias *backsplash* (Muriel & Coenda, 2014; Diemer et al., 2017) y II) incluir galaxias que van a desaparecer por eventos de fusiones con otras galaxias. Un ejemplo de lo anterior se presenta en la Fig. 1 donde las curvas grises corresponden a toda la muestra inicial dentro del cúmulo N° 0,

de masa virial $M_{200} = 2.32 \times 10^{14} M_{\odot}$, la línea continua magenta indica el crecimiento del radio virial; las curvas rojas corresponden a un conjunto de galaxias que hacían parte del mismo grupo y la curva azul a la que fue la galaxia central de dicho grupo acretado.

Cuando analizamos la estadística del número de grupos acretados en relación al número de galaxias (N_{gal}) que pertenecen a estos grupos, observamos que $\sim 60\%$ de las galaxias son acretadas como parte de grupos de $N_{\text{gal}} \geq 2$. El restante $\sim 40\%$ lo hacen directamente del campo (solos o lo que llamamos grupo de $N_{\text{gal}} = 1$).

3. Análisis de los grupos de galaxias a lo largo de la caída

3.1. Efecto del entorno sobre los grupos

La estructura de los grupos de galaxias acretados serán fuertemente afectados por el potencial del cúmulo a lo largo del tiempo de caída. Una forma de cuantificar esto es analizando su distribución en el espacio distancia proyectada contra velocidad en la línea de la visual, (conocido comúnmente como espacio de fase), donde un sistema de galaxias que conforman un grupo y por tanto interactúan gravitacionalmente entre sí, tendrán valores característicos de tamaño y dispersión de velocidades dentro de este plano. La distribución de galaxias en este tipo de espacios ha sido utilizada en la búsqueda de subestructura de galaxias dentro de cúmulos (Lisker et al., 2018; Biviano et al., 2002, 2013). Así, es de esperar que al presentar la ubicación y velocidad de movimiento de cada galaxia en este plano, aquellas que conviven juntas en un mismo halo deberán aparecer próximas entre sí. Un ejemplo de esto (para el mismo cúmulo de la Fig. 1) se muestra en el panel izquierdo de la Fig. 2 donde cada combinación color-marcador hace referencia a galaxias de un mismo grupo. Una vez caen dentro del cúmulo los efectos gravitacionales de este afectan la estructura del grupo, aumentando su dispersión de velocidades y tamaño característico inicial. Esto se observa en la distribución del panel derecho (para el mismo conjunto de galaxias anterior) en la época actual ($z = 0$). Encontramos que los tamaños de los grupos de galaxias aumenta en promedio un factor ~ 5 mientras que la dispersión de velocidades aumenta en un factor ~ 3 .

3.2. Fusiones a lo largo de la caída

Identificamos y analizamos un total de 171 eventos de fusión entre galaxias a lo largo del tiempo de caída. Dentro de los aspectos más relevante observamos que todos esto se dan entre galaxias que fueron miembros del mismo grupo. Esto es interesante debido a que si bien la probabilidad de encuentros entre galaxias dentro de un cúmulo es muy baja, los entornos de los grupos donde las dispersiones de velocidades son mucho más bajas favorecen dichos encuentros (Mihos, 2003; Sarron et al., 2019; Roberts & Parker, 2017; Vijayaraghavan & Ricker, 2013). Esto muestra que este preprocesamiento permanece durante algunos Gyrs después de la caída, aún bajo la fuerte acción gravitacional que ejerce el cúmulo sobre las galaxias. Convirtiendo la búsqueda y detección de

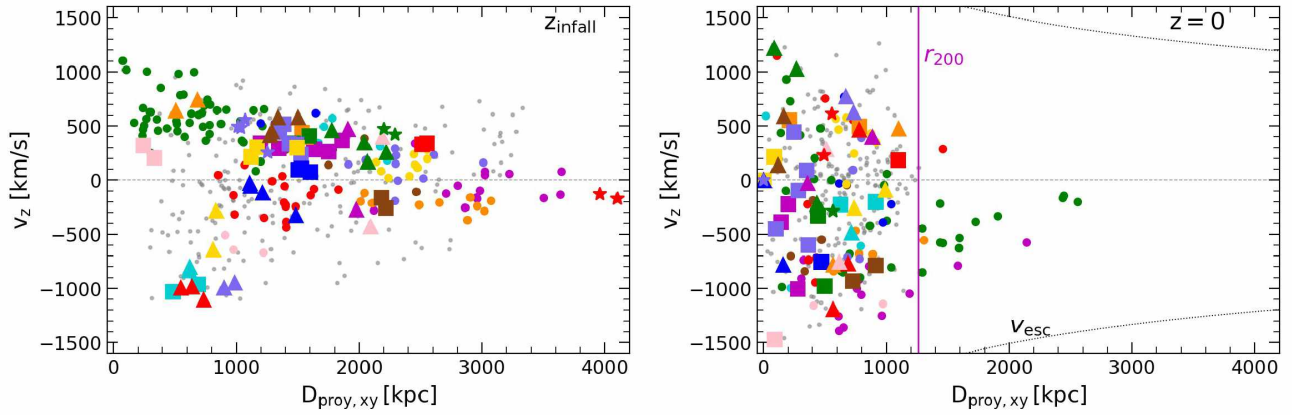


Figura 2: *Panel izquierdo:* Distancia proyectada como función de la velocidad en la línea de la visual (espacio de fase) para la muestra de galaxias del cúmulo N° 0, donde cada combinación color-marcaador corresponde a galaxias que hacían parte de un mismo grupo al momento de ser acretadas, los puntos grises indican galaxias individuales. *Panel derecho:* mismas galaxias del panel izquierdo pero presentando su distribución actual ($z = 0$), las líneas punteadas corresponden a la velocidad de escape del cúmulo.

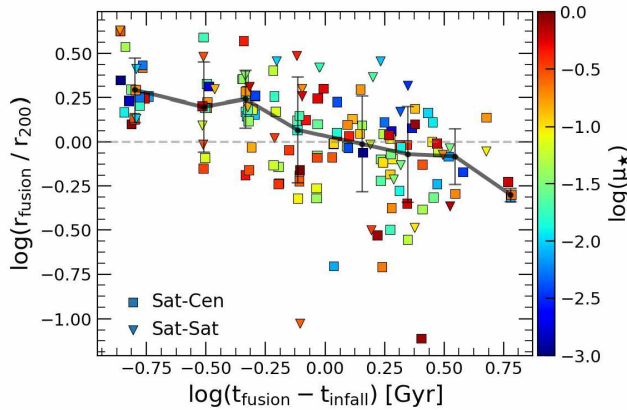


Figura 3: Relación entre la distancia en que ocurren las fusiones identificadas como función del intervalo de tiempo después de caer al cúmulo, diferenciados por tipo Satélite-Central y Satélite-Satélite. El código de color corresponde a la razón de masa estelar de las dos galaxias involucradas en la fusión.

estos remanentes de fusiones entre galaxias en un tipo de subestructura de grupos en el pasados. Una relación entre el intervalo de tiempo luego de la caída hasta que se da la fusión y la distancia al centro del cúmulo donde se da este evento es presentado en la Fig. 3. Allí se puede apreciar que cuanto mayor es el intervalo de tiempo se espera que las fusiones ocurran en regiones más interiores del cúmulo, encontrando que $\sim 40\%$ de las fusiones se dan dentro del radio virial.

4. Conclusiones

Luego del análisis de la caída de galaxias individuales y en grupos para en ensamblaje de cúmulos de galaxias encontramos que:

- Alrededor de un $\sim 60\%$ de las galaxias que conforman un cúmulo son acretadas como parte de grupos, siendo en su mayoría eventos de caída en grupos de

pocos miembros (2 a 4 con $M_* \gtrsim 1.5 \times 10^8 M_\odot$) y caída de grupos numerosos ($N_{\text{gal}} \gtrsim 5$) son escasos.

- Los efectos gravitacionales del cúmulo afecta las propiedades de tamaño y dispersión de velocidades de los grupos de galaxias acretados, borrando la mayor parte de su identidad de grupo en unos pocos miles de millones de años (2 a 3 Gyr) haciendo que sea muy difícil recuperar información de algún tipo de subestructura salvo para acreciones recientes.
- Los entornos de los grupos acretados generan condiciones dinámicas que favorecen los encuentros entre galaxias dentro de los cúmulos, así mismo los rastros de estas interacciones (como colas de marea o cascarones) serían indicadores de subestructura al interior de estos.

Agradecimientos: Agradecemos a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNC por el financiamiento de mi beca de doctorado y que hizo posible el desarrollo de este proyecto.

Referencias

- Benavides J.A., Sales L.V., Abadi M.G., 2020, MNRAS, 498, 3852
- Biviano A., et al., 2002, A&A, 387, 8
- Biviano A., et al., 2013, A&A, 558, A1
- Conselice C.J., Gallagher John S. I., 1998, MNRAS, 297, L34
- Davis M., et al., 1985, ApJ, 292, 371
- Diemer B., et al., 2017, ApJ, 843, 140
- Hinshaw G., et al., 2013, ApJS, 208, 19
- Iodice E., et al., 2019, arXiv e-prints, arXiv:1906.08187
- Lisker T., et al., 2018, ApJ, 865, 40
- Mihos C., 2003, arXiv e-prints, astro-ph/0305512
- Muriel H., Coenda V., 2014, A&A, 564, A85
- Roberts I.D., Parker L.C., 2017, MNRAS, 467, 3268
- Rodriguez-Gomez V., et al., 2015, MNRAS, 449, 49
- Sarron F., et al., 2019, A&A, 632, A49
- Springel V., et al., 2001, MNRAS, 328, 726
- Vijayaraghavan R., Ricker P.M., 2013, MNRAS, 435, 2713
- Vogelsberger M., et al., 2014a, MNRAS, 444, 1518
- Vogelsberger M., et al., 2014b, Nature, 509, 177