

# El origen de las galaxias Ultra-Difusas apagadas en el campo

J.A. Benavides<sup>1,2</sup>, M.G. Abadi<sup>1,2</sup> & L.V. Sales<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, CONICET-UNC, Argentina

<sup>2</sup> Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

<sup>3</sup> Department of Physics and Astronomy, University of California, EE.UU.

Contacto / jose.benavides@unc.edu.ar

**Resumen** / Utilizando las simulaciones numéricas cosmológicas TNG50 se explica el origen de las galaxias ultra-difusas (*UDGs*) rojas presentes en el campo a través de un mecanismo de caída a otra galaxia o cúmulo masivo y posterior eyección. Como resultado de esta interacción, la mayoría de las *UDGs* pierden su gas y dejan de formar estrellas convirtiéndose de azules y formadoras de estrellas a rojas y apagadas. Así mismo, una fracción significativa de su materia oscura es removida de estas *UDGs*, aunque esta pérdida de masa no es reflejada en la dispersión de velocidades de su componente estelar. Por otro lado, las violentas fuerzas de marea presentes durante la interacción no produce una expansión considerable en el tamaño de estas galaxias, desestimando este mecanismo como el origen de su extremadamente bajo brillo superficial.

**Abstract** / Using the TNG50 cosmological numerical simulations, the origin of the red ultra-diffuse galaxies (UDGs) present in the field is explained through a mechanism of falling to another galaxy or massive cluster and subsequent ejection. As a result of this interaction, most UDGs lose their gas and stop forming stars turning from blue and star-forming to red and quiescent. Likewise, a significant fraction of dark matter is removed from these UDGs, although this loss of mass is not reflected in the dispersion of velocities of their stellar component. On the other hand, the violent tidal forces present during the interaction do not produce a considerable expansion in the size of these galaxies, dismissing this mechanism as the origin of their extremely low surface brightness.

**Keywords** / galaxies: dwarf — galaxies: star formation — galaxies: interactions — galaxies: kinematics and dynamics

## 1. Introducción

Las galaxias ultra-difusas (*UDGs* por sus siglas en inglés) son un tipo particular de galaxias descubiertas en la década de los 80's por Sandage & Binggeli (1984), que poseen masas estelares típicas de galaxias enanas ( $\log(M_*/M_\odot) \lesssim 9$ ) y radios efectivos significativamente grandes ( $R_e \gtrsim 1.5$  kpc), por lo que aparecen en el cielo como objetos de bajo brillo superficial ( $\mu \gtrsim 24$  mag arcsec<sup>-2</sup>). Este tipo de galaxias han sido observadas en regiones densas como grupos y cúmulos de galaxias (van der Burg et al., 2017; van Dokkum et al., 2015a,b, 2019b; Lim et al., 2020) y en el campo (Papastergis et al., 2017; Román et al., 2019; Rong et al., 2020), presentando características (morfología, población estelar, color, etc.) similares a otros objetos propios dichos entornos. Sin embargo, algunas de estas galaxias con baja o nula formación estelar ('apagadas') han sido observadas en entornos de baja densidad, donde las galaxias son típicamente ricas en gas y formadoras de estrellas.

Una descripción completa sobre el mecanismo de formación y evolución de estas galaxias ultra-difusas apagadas en el campo fue presentado en Benavides et al. (2021), mediante el uso de simulaciones cosmológicas hidrodinámicas. Allí se explica cómo estas galaxias

se formaron como galaxias ultra-difusas normales en el campo, posteriormente cayeron en halos masivos ( $12.5 \lesssim \log(M_{200}/M_\odot) \lesssim 14.5$ ), donde fueron desprovista de su gas y devueltas al campo siguiendo órbitas poco ortodoxas, conocidas como *backsplash* (Balogh et al., 2000; Mamon et al., 2004; Muriel & Coenda, 2014). En ese sentido, este manuscrito corresponde a una extensión de dicho trabajo, donde se incluyen algunos detalles sobre la dinámica de su población estelar en relación al contenido de materia oscura y la evolución de sus tamaños, antes y después de la interacción con aquellos halos masivos.

El trabajo está organizado de la siguiente manera. En la Sec. 2 presentamos algunos detalles de la simulación TNG50 y la selección de los datos para nuestro análisis. En la Sec. 3 analizamos algunos efectos del entorno sobre la estructura de las *UDGs* *backsplash*. Finalmente se presentan algunas conclusiones y referencias.

## 2. Simulación y Metodología

Del proyecto de simulación de última generación Illustris-TNG (Pillepich et al., 2018b,a; Nelson et al., 2019b), la simulación TNG50 (Pillepich et al., 2019;

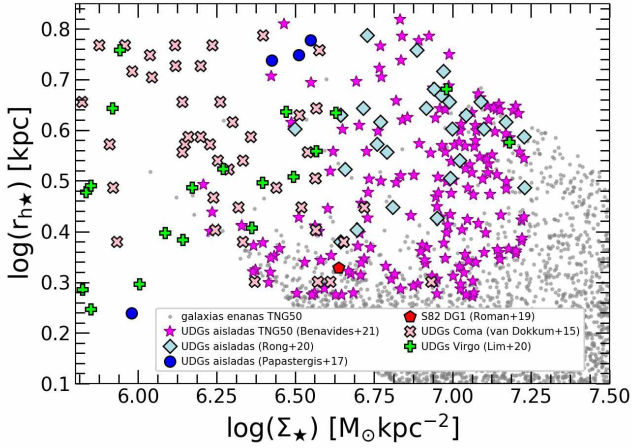


Figura 1: Relación entre el radio a mitad de masas estelar y la densidad superficial de masa. Los puntos grises corresponden a todas las galaxias y las estrellas magenta a las galaxias ultra-difusas aisladas de la simulación TNG50, analizadas en Benavides et al. (2021). Se han incluido datos observacionales de otras *UDGs* tanto en agrupaciones como en el campo (Rong et al., 2020; Papastergis et al., 2017; Román et al., 2019; van Dokkum et al., 2015b; Lim et al., 2020).

Nelson et al., 2019a) corresponde a una que, por el tamaño de la caja (51.7 Mpc de lado) y resolución por partícula\*, permite estudiar a la vez la formación y evolución de galaxias, tanto grandes y enanas, en diferentes entornos. La simulación fue corrida con el código AREPO (Springel, 2010), con condiciones iniciales establecidas en  $z = 127$  usando el código N-GENIC (Springel, 2015) y parámetros cosmológicos consistentes con resultados de la Misión Planck (Alves et al., 2016):  $\Omega_m = \Omega_{\text{dm}} + \Omega_{\text{bar}} = 0.3089$ , constante cosmológica  $\Omega_\Lambda = 0.6911$ , con  $h = 0.6774$  y  $\sigma_8 = 0.8159$ . La identificación de los halos y subhalos de hace a través de Friends-of-Friends (Davis et al., 1985) y SUBFIND (Springel, 2010); para el seguimiento de los halos a lo largo del tiempo se utilizó el SUBLINK merger trees (Rodríguez-Gomez et al., 2015). La simulación incluye un halo de masa virial\*\* comparable al Cúmulo de Virgo ( $\log(M_{200}/M_\odot) > 14$ ) y un número significativo de grupos masivos ( $13 < \log(M_{200}/M_\odot) < 14$ ).

Para el desarrollo de este trabajo se consideró la población de galaxias enanas con masa estelares entre  $10^{7.5}$  y  $10^9 M_\odot$ . Definimos las galaxias ultra-difusa como la población del 5% más extendido en la relación masa-tamaño, dejando una muestra de galaxias cuyo tamaño y brillo superficial ( $R_e \gtrsim 1.5$  kpc y  $\Sigma_* \lesssim 7.25 M_\odot \text{ kpc}^{-2}$ ) son consistentes con datos observacionales, como se muestra en la Fig. 1. Además, nos quedamos solo con las galaxias centrales, debido

\*  $m_{\text{dm}} = 4.58 \times 10^5 M_\odot$ ,  $m_{\text{gas}} = 8.41 \times 10^4 M_\odot$  y longitud de ablandamiento para la interacción gravitacional de  $\epsilon_{\text{dm},*}^{z=0} \sim 0.29$  kpc.

\*\* Aquí usamos la definición de radio virial ( $r_{200}$ ) como el radio de una esfera cuya densidad media es 200 veces la densidad crítica del Universo ( $\rho_c = 3H^2/8\pi G$ ) y la masa virial ( $M_{200}$ ) a la masa contenida en dicha esfera.

a que nuestro objetivo es analizar las galaxias ultra-difusas en entornos de baja densidad.

### 3. Análisis de los objetos remanentes

La población de galaxias ultra-difusas simuladas fue separada en formadoras de estrellas o apagadas, que a su vez correlaciona con una distribución bimodal en el color ( $g - r$ ) y la población estelar, como se muestra en Benavides et al. (2021). Allí se discutió cómo esta diferencia en la formación estelar para galaxias en el campo estaba relacionada con que cerca del  $\sim 25\%$  de estas galaxias habían interactuado con un sistema masivo ( $M_{200} > 10^{12.5} M_\odot$ ) en el pasado, ingresando a las regiones más densas del halo donde las fuerzas de marea experimentadas son más intensas y como consecuencia de esto: i) perdieron su gas y un gran porcentaje de materia oscura de las partes exteriores del halo y ii) debido al tipo de órbitas que siguen estas galaxias (preferentemente radiales y con grandes distancias apocéntricas) posteriormente regresan al campo (Sales et al., 2007), como objetos enrojecidos y apagados.

Se han discutido evidencias observacionales, a partir de mediciones en la dispersión de velocidades de sus cúmulos globulares, que apuntan a que algunas de estas galaxias ultra-difusas podrían tener un bajo contenido de materia oscura en relación a su masa total (van Dokkum et al., 2018, 2019a), presentando un desafío para el modelo de formación de galaxias del  $\Lambda$ CDM. En ese sentido realizamos mediciones en la dinámica de las estrellas en la muestra de galaxias ultra-difusas aisladas (dentro de 1 y 2 veces el radio a mitad de masa estelar), como se muestra en la Fig. 2. Se observa un amplio scatter en la velocidad circular del halo para el caso de las *UDGs* apagadas, respecto de las formadoras de estrellas, esto como consecuencia de una pérdida importante de materia oscura. Sin embargo, las mediciones realizadas en las dispersión de velocidad de las estrellas muestra una distribución muy similar para ambos tipos de galaxias, lo cual está en buen acuerdo con el trabajo de Zahid et al. (2018). De esta manera, las galaxias con un déficit de materia oscura no habrían tenido el tiempo suficiente para compensar esta pérdida, modificando la dinámica de las estrellas.

Finalmente analizamos la evolución en los tamaños para la población de ultra-difusas *backsplash*, antes y después de la interacción. Para ello medimos el tamaño que tenían estas galaxias antes de cruzar el radio virial de su halo anfitrión ( $z_{\text{infall}}$ ) en relación a su valor a  $z = 0$ , como se muestra en la Fig. 3. Se observa un incremento sistemático en los tamaños de las galaxias, que en promedio es alrededor del  $\sim 26\%$ , lo cual podría representar un crecimiento significativo, pero no suficiente para considerar que dicha interacción tuvo efectos relevantes en la formación de las galaxias ultra-difusas, como se ha propuesto en trabajos anteriores (Carleton et al., 2019; Sales et al., 2020).

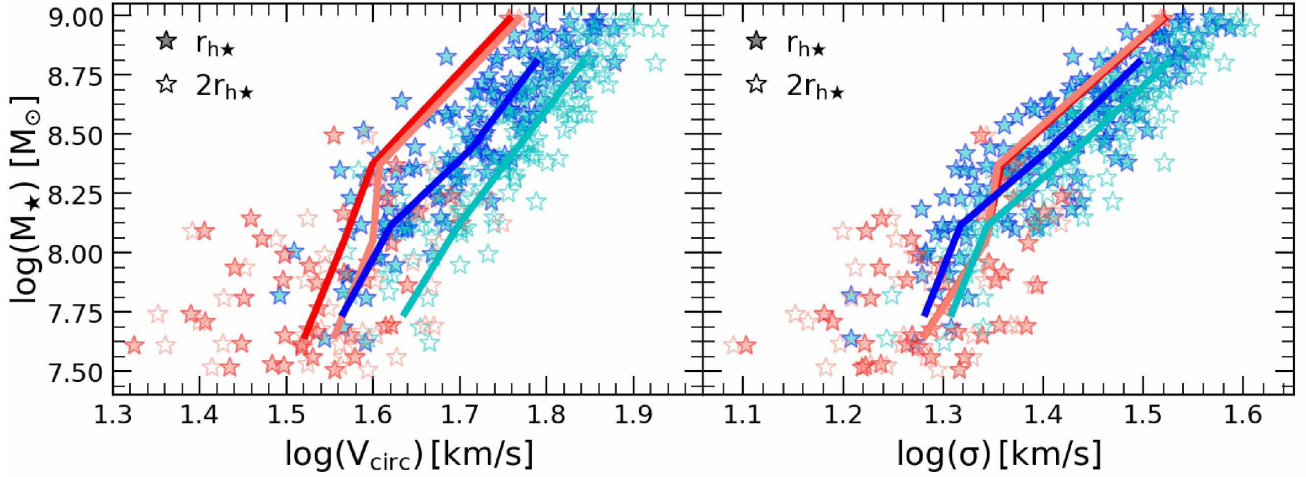


Figura 2: Velocidad circular (izquierda) y dispersión de velocidades (derecha) como función de la masa estelar para la muestra de *UDGs* aisladas. Los símbolos rellenos y vacíos corresponden a mediciones dentro de una o dos veces el radio a mitad de masa estelar, respectivamente. Las líneas en cada panel corresponden a las medianas por bin de masas estelar.

#### 4. Conclusiones

Luego del análisis de la caída de galaxias ultra-difusas *backsplash* en halos con  $M_{200} > 10^{12.5} M_{\odot}$  encontramos que:

La pérdida de materia oscura del halo no presenta un efecto significativo en la dinámica de las estrellas, por lo que una estimación del contenido total de masa, para este tipo de galaxias, a partir de mediciones de dispersión de velocidades, podría estar sobreestimado.

La evolución en el tamaño de las galaxias que cayeron en un halo masivo en el pasado, no representa un aumento significativo para considerarlo un mecanismo eficiente en la formación de galaxias ultra-difusas.

*Agradecimientos:* Agradecemos a la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SeCyT) de la UNC y al CONICET por el financiamiento de mi beca de doctorado, haciendo posible el desarrollo de este proyecto.

#### Referencias

Alves J., et al., 2016, *A&A*, 594, E1  
 Balogh M.L., Navarro J.F., Morris S.L., 2000, *ApJ*, 540, 113  
 Benavides J.A., et al., 2021, *Nat. Astron.*, 5, 1255  
 Carleton T., et al., 2019, *MNRAS*, 485, 382  
 Davis M., et al., 1985, *ApJ*, 292, 371  
 Lim S., et al., 2020, *ApJ*, 899, 69  
 Mamon G.A., et al., 2004, *A&A*, 414, 445  
 Muriel H., Coenda V., 2014, *A&A*, 564, A85  
 Nelson D., et al., 2019a, *MNRAS*, 490, 3234  
 Nelson D., et al., 2019b, *Comput. Astrophys. Cosmol.*, 6, 2  
 Papastergis E., Adams E.A.K., Romanowsky A.J., 2017, *A&A*, 601, L10  
 Pillepich A., et al., 2018a, *MNRAS*, 475, 648  
 Pillepich A., et al., 2018b, *MNRAS*, 473, 4077  
 Pillepich A., et al., 2019, *MNRAS*, 490, 3196  
 Rodríguez-Gómez V., et al., 2015, *MNRAS*, 449, 49  
 Román J., et al., 2019, *MNRAS*, 486, 823  
 Rong Y., et al., 2020, *ApJL*, 899, L12

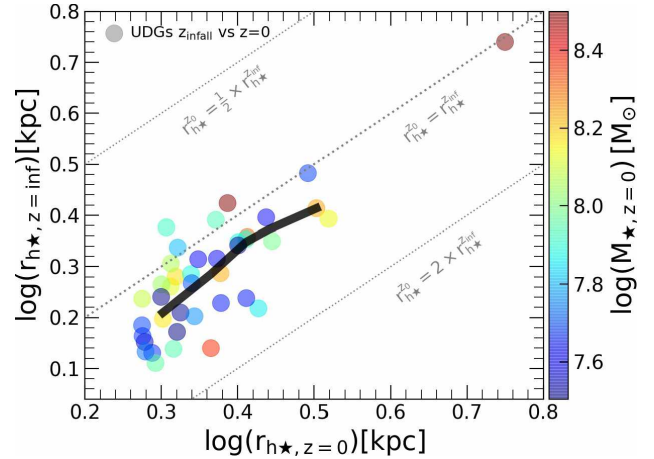


Figura 3: Evolución de los tamaños (radio a mitad de masas estelar) para la muestra de galaxias ultra-difusas que tuvo un pasaje por el interior de un halo masivo en el pasado, medidos al momento de cruce del radio virial ( $z_{\text{infall}}$ ) respecto de su valor actual ( $z = 0$ ). La línea negra corresponde al perfil de las medianas y el código de color a la masa estelar. Las líneas diagonales en gris indican crecimientos o reducción en los tamaños en un factor 2.

Sales L.V., et al., 2007, *MNRAS*, 379, 1475  
 Sales L.V., et al., 2020, *MNRAS*, 494, 1848  
 Sandage A., Binggeli B., 1984, *AJ*, 89, 919  
 Springel V., 2010, *MNRAS*, 401, 791  
 Springel V., 2015, *N-GenIC: Cosmological structure initial conditions*, Astrophysics Source Code Library  
 van der Burg R.F.J., et al., 2017, *A&A*, 607, A79  
 van Dokkum P., et al., 2018, *Nature*, 555, 629  
 van Dokkum P., et al., 2019a, *ApJL*, 874, L5  
 van Dokkum P., et al., 2019b, *ApJ*, 880, 91  
 van Dokkum P.G., et al., 2015a, *ApJL*, 798, L45  
 van Dokkum P.G., et al., 2015b, *ApJL*, 804, L26  
 Zahid H.J., Sohn J., Geller M.J., 2018, *ApJ*, 859, 96