



Galaxias de bajo brillo superficial: Desafiando límites

A.V. Smith Castelli^{1,2}

¹ *Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina*

² *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina*

Contacto / asmith@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / A pesar del avance en la instrumentación astronómica de las últimas décadas, las galaxias de bajo brillo superficial (LSB, por sus siglas en inglés; $\mu_{0g} \gtrsim 24 \text{ mag seg}^{-2}$) representan aún un desafío para la astronomía actual. Originalmente identificadas en el Grupo Local, las denominadas “enanas esferoidales” (dSph, por sus siglas en inglés) constituyen el prototipo de galaxia LSB en el extremo de baja masa, y su detección fuera del Grupo Local se inicia a mediados de los años 80 en el cúmulo de Virgo. Por su parte, la galaxia Malin 1, descubierta a fines de los años 80, representa un ejemplo extraordinario de galaxia gigante de este tipo. Los estudios de galaxias LSB dentro y fuera del Grupo Local se han incrementado en la última década, gracias a la puesta en marcha de relevamientos de grandes áreas del cielo y del acceso a telescopios de 8–10 mts de diámetro. El creciente interés en su detección proviene del hecho de que su estudio establece condiciones de contorno para los modelos de formación y evolución de galaxias. En este informe me propongo repasar las propiedades más relevantes de las galaxias LSB, así como también mostrar el desafío que, aún hoy en día, representa la caracterización de estos objetos. Asimismo, presentaré resultados del estudio de galaxias LSB obtenidos por el grupo de investigación en “Sistemas Estelares Extragalácticos y su Contexto Cosmológico” (IALP-FCAG) del cual actualmente soy miembro.

Abstract / Despite the advance in astronomical instrumentation during the last decades, the study of low surface brightness (LSB; $\mu_{0g} \gtrsim 24 \text{ mag arcsec}^{-2}$) galaxies still represents a challenge. In the low-mass regime, the Dwarf Spheroidal (dSph) galaxies of the Local Group (LG) are considered the prototype of this kind of objects and their discovery beyond the LG starts at mid 80's in the Virgo cluster. The galaxy Malin I, discovered in the late 80's, is an example of a giant galaxy of this type. Studies of LSB galaxies in and outside the LG have significantly increased in the last decade, thanks to the development of surveys covering large areas of the sky and to the access of 8-m class telescopes. The interest in these galaxies arises because they impose strong constraints to the models of galaxy formation and evolution. In this report I will review the main properties of LSB galaxies and will show the challenge that their characterization still represents nowadays. In addition, I will present results from studies of this type of galaxies performed by members of the research group on “Extragalactic Stellar Systems and their Cosmological Context” (IALP-FCAG).

Keywords / methods: observational — galaxies: general

1. Galaxias de bajo brillo superficial en el Grupo Local

Las galaxias de bajo brillo superficial (LSB, por sus siglas en inglés) de baja masa fueron originalmente identificadas en el Grupo Local (GL), y recibieron el nombre de galaxias enanas esferoidales (de aquí en más, dSph, por sus siglas en inglés). Una cantidad significativa de estas galaxias ($\sim 60\%$) son satélites de la Vía Láctea o de Andrómeda (McConnachie, 2012). Debido a su bajo brillo superficial (esto es, a su bajo brillo por unidad de área) se dificulta su identificación. Sin embargo, a lo largo de los años se han detectando nuevos integrantes del GL gracias a observaciones con grandes telescopios y a la realización de grandes relevamientos estelares o de grandes áreas del cielo con telescopios de pequeña envergadura (ver, por ejemplo, Torrealba et al., 2019). Como ejemplo, en la Fig. 1 se muestran dos de las primeras dSph identificadas en el GL: NGC 147 y Fornax.

Las galaxias dSph presentan bajas luminosidades, comprendidas en el rango $-14 \lesssim M_V \lesssim -2 \text{ mag}$ (McConnachie, 2012). No muestran formación estelar y pre-

sencia de gas en forma evidente, lo cual dificulta su detección, y su principal característica es la de presentar brillos superficiales centrales extremadamente bajos ($\mu_{0V} > 24 \text{ mag seg}^{-2}$; McConnachie 2012).

Debido a su apariencia y luminosidades similares (ver, por ejemplo, la Fig. 3 de Martin et al., 2015 o Laevens et al. 2015), inicialmente las galaxias dSph fueron consideradas como cúmulos globulares (CGs) extendidos ($r_{\text{eff}} \sim 100\text{--}1000 \text{ pc}$, en contraposición a los $\sim 10 \text{ pc}$ típicos observados en los CGs; ver, por ejemplo, la Fig. 6 de McConnachie, 2012, y referencias allí mencionadas). Incluso, algunas galaxias dSph ultra-débiles presentan, a su vez, poblaciones estelares constitutivas semejantes a las observadas en CGs galácticos (ver, por ejemplo, Brown et al., 2014). Sin embargo, el estudio de las dispersiones de velocidades de las galaxias dSph ($\sigma \sim 2\text{--}10 \text{ km s}^{-1}$; Collins et al., 2014) mostraron que, a diferencia de lo que sucede con los CGs, ellas presentarían un significativo contenido de materia oscura, cubriendo un rango de relaciones masa-luminosidad (M/L) de entre 10 y 1000 (Collins et al., 2013). Esto convertiría a estas galaxias en los objetos con mayor contenido de

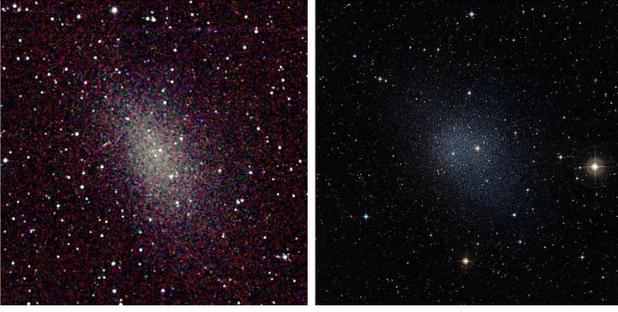


Figura 1: Dos de las primeras galaxias dSph identificadas en el Grupo Local (GL): NGC 147 (*panel izquierdo*) y Fornax (*panel derecho*). Créditos: Two Micron All Sky Survey (2MASS) y ESO/Digitized Sky Survey 2.

materia oscura hasta ahora conocidos en el Universo. A modo ilustrativo, en la Fig. 2 se muestran tres de los CGs identificados en la galaxia dSph Fornax. Se puede apreciar que si bien Fornax 3 presenta una morfología esférica típica de un CG, Fornax 1 y Fornax 2 muestran apariencias similares a galaxias dSph.

En particular, el GL presenta una masa de $2.3 \times 10^{12} M_{\odot}$ (Peñarrubia et al., 2014), y en él se han identificado, hasta el momento, aproximadamente 100 galaxias con masas menores a la Nube Menor de Magallanes dentro de un radio de 1 Mpc (Cole, 2019, y referencias allí mencionadas). A excepción de la Vía Láctea, Andrómeda y M33, el resto de las galaxias del GL son galaxias de masa intermedia y baja, y aproximadamente un 60 % de ellas está catalogado como galaxias dSph (ver, por ejemplo, McConnachie, 2012). Un aspecto interesante referido al GL es que se ha encontrado que los satélites de la Vía Láctea y Andrómeda se distribuyen en torno a sus galaxias dominantes definiendo diferentes planos orbitales (Pawlowski et al., 2013).

2. Galaxias LSB fuera del Grupo Local

Fuera del GL, la primera detección de galaxias LSB se realiza gracias a la construcción de un Atlas fotográfico de galaxias enanas en el cúmulo de Virgo (Sandage & Binggeli, 1984). El límite en brillo de dicho Atlas es $M_B = -14$ mag, lo cual permitió incluir galaxias tan débiles como Sextante A y B del GL. Pero lo más llamativo de este Atlas es que se detecta un nuevo tipo de galaxia de gran tamaño (diámetro ~ 10 kpc) con bajo brillo superficial central ($\mu_{0B} > 25$ mag seg $^{-2}$), que muestra tanto morfologías de tipo temprano (dE) como tardío (Im), y que, hasta ese momento, no había sido detectado en el Universo Local.

Un ejemplo extraordinario de galaxia LSB gigante lo constituye Malin 1 (Fig. 3), descubierta por accidente en 1987 por Bothun et al. (1987). Esta galaxia se encuentra ubicada a $z = 0.083$ y es extremadamente rica en HI ($M_{\text{HI}} = 1.0 \times 10^{11} M_{\odot}$). Por otra parte, exhibe un disco extenso con una longitud de escala de $45''$ y $\mu_{0V} = 25.5$ mag seg $^{-2}$. En general, las galaxias de este tipo se ubican en medios de baja densidad y se argumenta que el gran tamaño del disco es el resultado de que ellas han nacido y evolucionado en esos medios, pero

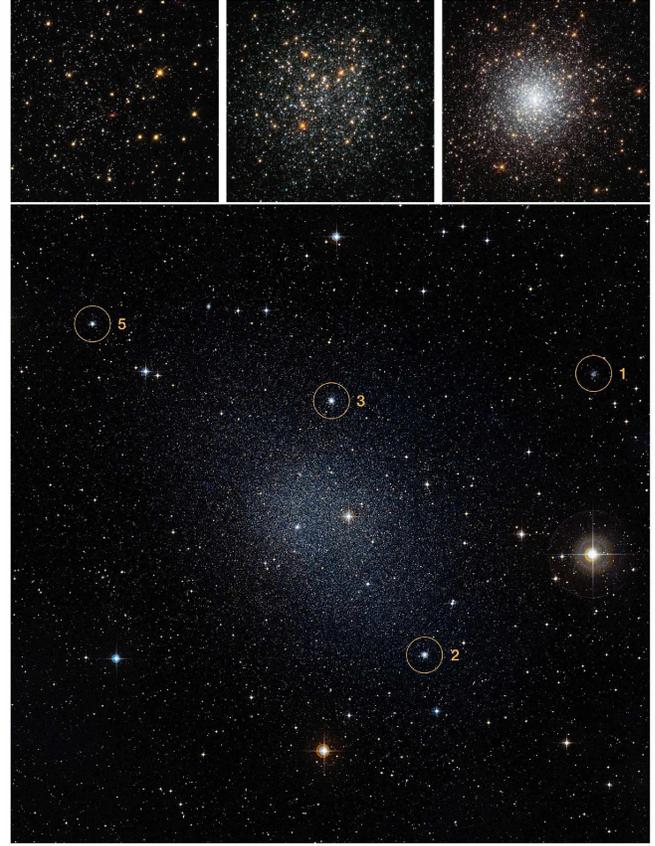


Figura 2: *Paneles Superiores*: Tres de los cúmulos globulares (CGs) identificados en la galaxia dSph Fornax. De izquierda a derecha, se presentan Fornax 1, Fornax 2 y Fornax 3. Si bien Fornax 3 despliega una morfología esférica y compacta, típica de un CG, Fornax 1 y Fornax 2 presentan morfologías difusas y extendidas, similares a las mostradas por las galaxias dSph. *Panel Inferior*: Imagen de la galaxia dSph Fornax mostrando la posición y tamaños relativos de sus CGs. Créditos: NASA, ESA, S. Larsen (Radboud University, the Netherlands) y ESO/Digitized Sky Survey 2

contando a su vez con un reservorio rico en gas (como ser un filamento cósmico) que ha ayudado a preservar el disco gigante (ver, por ejemplo, Saburova et al., 2019).

Desde ese entonces, se han detectado nuevas galaxias LSB, pero hace aproximadamente 5 años, la búsqueda de este tipo de objetos en el Universo Local se ha intensificado mediante la puesta en marcha de relevamientos sistemáticos. Un ejemplo de tales relevamientos es el denominado “Dragonfly”, el cual es llevado adelante en el cúmulo de Coma, mediante un arreglo de lentes Canon de 400 mm (van Dokkum et al., 2015). Con este arreglo, se identificaron inicialmente 6 624 objetos débiles y extendidos para la resolución y profundidad de imagen provistas por dicho arreglo. Luego, de esta muestra se consideraron sólo aquellos objetos que no tuvieran contrapartes asociadas a sus posiciones en el Sloan Digital Sky Survey (SDSS)*, lo cual redujo el número de candidatos a 344. Finalmente, realizando un seguimiento con el telescopio CFHT de 3.6 m de diámetro, se obtuvo una muestra final de 46 galaxias LSB en el cúmulo de Coma.

*<https://www.sdss.org/>

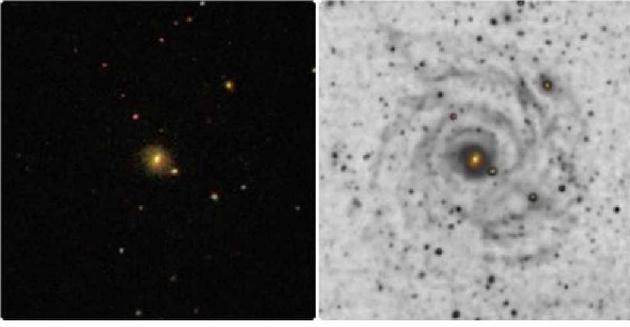


Figura 3: *Panel izquierdo:* Imagen de Malin 1 obtenida de la base de datos del Sloan Digital Sky Survey (SDSS). La extensión total de la galaxia en esta imagen es de $15''$ o 26.5 kpc. *Panel derecho:* Composición de la imagen de Malin 1 obtenida de la base de datos del SDSS, con la misma imagen procesada para destacar los brazos espirales que resultan ser estructuras LSB. La longitud de escala del disco en esta imagen procesada es de $45''$. Créditos: SDSS/Giuseppe Donatiello.

Los objetos detectados por Dragonfly muestran varios aspectos similares a las galaxias dSph del GL, como por ejemplo su apariencia y luminosidad. Sin embargo, si se las considera miembros del cúmulo de Coma, algunas de estas galaxias parecen mostrar tamaños mayores a los de las galaxias dSph del GL. Debido a este aspecto particular, van Dokkum et al. (2015) las denominan galaxias ultra-difusas (UDGs, por sus siglas en inglés) para diferenciarlas de las galaxias dSph del GL. Las UDGs se diferencian a su vez de las de tipo Malin 1 en que no presentan una componente (bulbo) de alto brillo superficial y no muestran brazos espirales.

En la Fig. 4 se presenta un ejemplo de una UDG detectada en la dirección del cúmulo de Coma por Dragonfly: la galaxia DF17. Debido a que la cámara ACS del Telescopio Espacial Hubble (HST, por sus siglas en inglés) no es capaz de resolver sus estrellas, y debido a la apariencia extendida y difusa que presenta DF17 en las imágenes del HST, van Dokkum et al. (2015) establecen que esta galaxia es miembro de Coma. A la distancia de Coma ($D \sim 100$ Mpc), DF17 presentaría un radio efectivo (r_{eff} ; radio que encierra la mitad de la luz de un objeto) de 3.4 kpc, similar al del disco de la Vía Láctea.

3. Nuestro Trabajo

3.1. HCG 44

Durante los años 2009 y 2010, algunos miembros del grupo de investigación en “Sistemas Estelares Extragalácticos y su Contexto Cosmológico” (SEECC) de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata, y del Instituto de Astrofísica de La Plata, obtuvimos imágenes profundas con el telescopio Gemini Norte del Grupo Compacto de Hickson 44 (HCG 44 por sus siglas en inglés; programas GN-2009B-Q-64 y GN-2010B-Q-29, PI: A. Smith Castelli). Hickson (1982) identificó 100 grupos compactos, cuyas características principales son las de contener entre cuatro y diez galaxias en un volumen tal que las

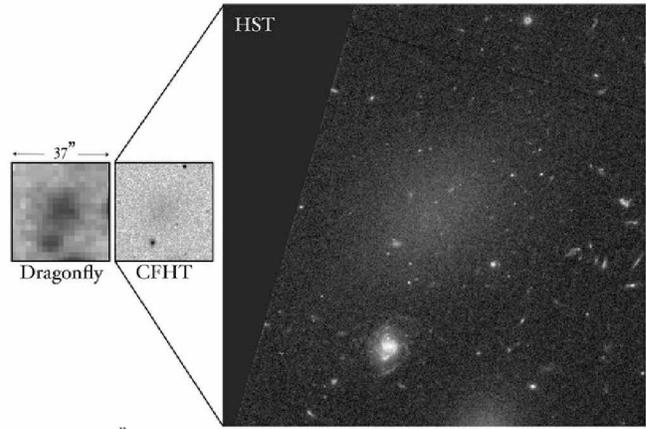


Figura 4: *Panel izquierdo:* Imágenes de la UDG DF17, ubicada hacia el cúmulo de Coma, obtenidas por el relevamiento Dragonfly y con el telescopio CFHT. *Panel derecho:* Imagen de DF17 obtenida con la cámara ACS del Telescopio Espacial Hubble. Debido a la apariencia extendida y difusa que muestra DF17 en esta imagen, y al hecho de que la cámara ACS no es capaz de resolver las estrellas de esta galaxia, se establece para DF17 una distancia mayor a 50 Mpc. Créditos: van Dokkum et al. (2015). ©AAS. Reproducido con permiso.

densidades de estos grupos son similares a las de las regiones centrales de los cúmulos ricos de galaxias. Presentan, además, bajas dispersiones de velocidades entre sus miembros, por lo que se espera que ocurran interacciones y fusiones entre ellos. Por último, estos grupos se encuentran apartados de otras asociaciones o grupos de galaxias, por lo que se ubican en regiones del Universo de baja densidad.

En el caso particular de HCG 44 ($D \sim 20$ Mpc), originalmente fue considerado por Hickson (1982) como un grupo dominado por la galaxia elíptica NGC 3193 e integrado, además, por otras tres galaxias brillantes: una galaxia de tipo morfológico Sa (NGC 3189/3190), una galaxia SBc (NGC 3185) y una galaxia Sd (NGC 3187). Posteriormente, Williams et al. (1991) identificó una galaxia enana ([WMv91] 1015+2203) con un corrimiento al rojo en acuerdo con el que mostraría HCG 44, y Bort-hakur et al. (2010) detectó cuatro miembros adicionales a partir de un estudio de HI en este grupo, incrementando el número de miembros a nueve. Sin embargo, a partir del método de las fluctuaciones de brillo, Tonry et al. (2001) obtiene para NGC 3193 una distancia que la convertiría en una galaxia de fondo ($D \sim 34$ Mpc), y Serra et al. (2013) determina para [WMv91] 1015+2203 una velocidad radial de $1\,940 \text{ km s}^{-1}$, mayor a la velocidad radial media del grupo ($1\,379 \text{ km s}^{-1}$ de acuerdo con NED**). En consecuencia, se encuentra aún en discusión la verdadera conformación de la población de galaxias de HCG 44.

A partir de nuestras observaciones de seis campos de GMOS ($5.5' \times 5.5'$) que cubren todas las galaxias brillantes ubicadas en la zona de HCG 44, fuimos capaces de detectar dos objetos extendidos LSB ($\mu_{0g} > 26.2 \text{ mag seg}^{-2}$). El primero de ellos se encuentra oculto

**<https://ned.ipac.caltech.edu/>

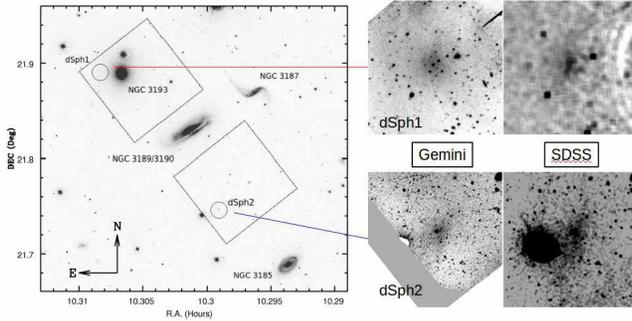


Figura 5: *Panel izquierdo:* Mosaico de $19.7' \times 18.3'$ en el filtro g' de la zona de HCG 44 obtenido de la base de datos del SDSS DR12. En él se muestra la ubicación de los dos campos de GMOS en los que se detectaron los dos objetos extendidos LSB (cuadrados grandes) y las ubicaciones específicas de dichos objetos en los campos mencionados (círculos abiertos). *Panel derecho:* Se muestran las apariencias de los dos objetos LSB detectados hacia HCG 44, en las imágenes de Gemini (izquierda) y en las imágenes del SDSS (derecha). Con segmentos rojos y azules, se señalan las respectivas ubicaciones de estos objetos en los campos obtenidos con Gemini. Créditos: Smith Castelli et al. (2016).

bajo el halo de la galaxia NGC 3193, y el segundo se encuentra ubicado entre las galaxias NGC 3189/3190 y NGC 3185 (Fig. 5). Del análisis fotométrico de estos objetos surge que si ambos fueran miembros de HCG 44, mostrarían tamaños en acuerdo con las UDGs reportadas en Coma (Smith Castelli et al., 2016). Sin embargo, para confirmar que ambos objetos pertenecen efectivamente a HCG 44, sería necesario contar con datos espectroscópicos a partir de los cuales poder medir sus velocidades radiales.

3.2. Pegasus I

Dentro del grupo SEEC, en el año 2008 comenzamos una campaña de observación con los telescopios Gemini del grupo Pegasus I ($D \sim 53$ Mpc; Cantiello et al., 2007), con el fin de estudiar su población de galaxias y CGs. Pegasus I se encuentra dominado en su región central por dos galaxias elípticas masivas, NGC 7619 y NGC 7626, que se encuentran en interacción. Estas galaxias están rodeadas por galaxias satélites de las que se conocen **sólo** una decena de velocidades radiales. El grupo, en general, ha sido poco estudiado con anterioridad, tanto en lo que se refiere a fotometría como a espectroscopía (para más detalle sobre Pegasus I, ver el trabajo de Faifer y colaboradores en este mismo boletín).

Mediante la inspección visual de los distintos campos observados hasta este momento (Fig. 6), pudimos identificar ocho galaxias LSB (González et al., 2018), sumadas a otras tres recientemente identificadas en un campo de comparación alejado del centro del grupo. Tres de los ocho objetos identificados inicialmente serían compatibles con UDGs, y uno de estos objetos presentaría en su centro un objeto semi-resuelto que podría tratarse de un núcleo (Fig. 7).

A partir de nuestro análisis en Pegasus I, surge la pregunta de si las galaxias que detectamos allí serían

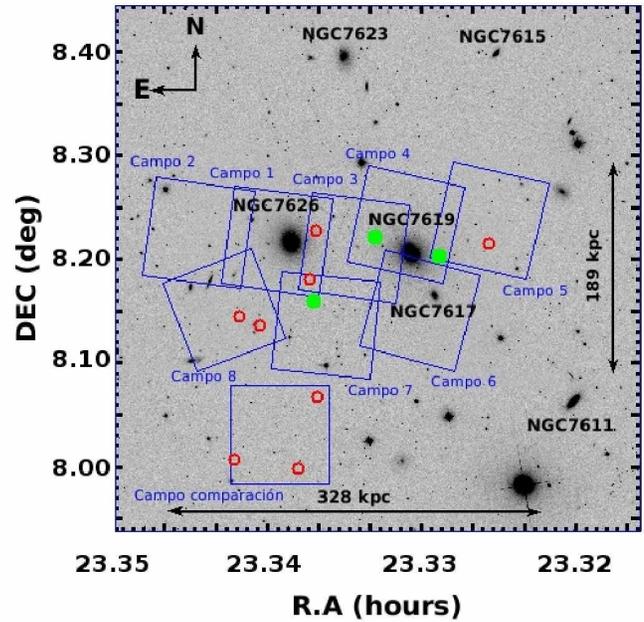


Figura 6: Distribución espacial de los 11 objetos LSB (círculos abiertos rojos y verdes) detectados hasta el momento por el grupo SEEC en Pegasus I. Los cuadrados grandes azules indican los campos Gemini-GMOS observados hasta el momento por nuestro grupo. Si se encontraran a la distancia de Pegasus I, los objetos destacados en color verde serían comparables en tamaño a las UDGs detectadas en Coma por van Dokkum et al. (2015). Créditos: N. González, Tesis Doctoral, en preparación.

similares a las dSph del GL. Para ello, comparamos sus perfiles de brillo con algunos de las galaxias LSB que son satélites de Andrómeda y notamos que estas últimas tienen brillos superficiales centrales más altos pero son más compactas que nuestros objetos. En consecuencia, si estos objetos existieran en Pegasus I, por sus características podrían ser confundidos con galaxias de fondo. Los objetos que logramos identificar hasta el momento en nuestros campos como “galaxias análogas a los satélites de Andrómeda” presentarían una distribución espacial particular dentro de Pegasus I, diferente a la que muestran las galaxias de bajo brillo superficial que identificamos visualmente. Nos encontramos trabajando en la publicación referente a estos objetos.

4. A modo de conclusión

4.1. Posibles orígenes de las galaxias LSB

¿Qué se puede decir acerca del origen de las galaxias de bajo brillo superficial?

De acuerdo con Kroupa (2012), el actual modelo cosmológico estándar requiere que existan dos tipos de galaxias enanas: galaxias enanas de origen primordial, dominadas por materia oscura (enanas tipo A), y galaxias enanas de origen tidal o surgidas por procesos de tipo *ram-pressure* que no presentarían contenido de materia oscura (enanas tipo B). En este contexto, las galaxias dSph del GL serían galaxias primordiales y, en ese caso, se esperaría que sus propiedades físicas y dinámicas pu-

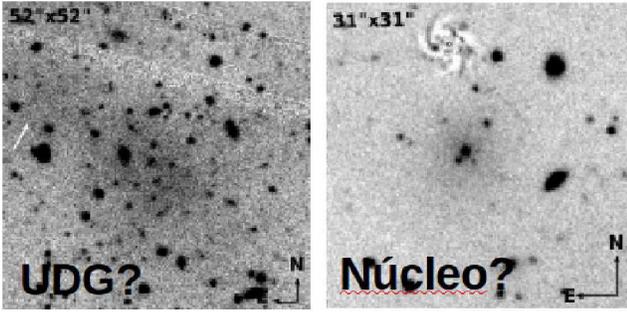


Figura 7: Imágenes en el filtro r' de uno de los objetos que sería compatible con una UDG a la distancia de Pegasus I (panel izquierdo), y del objeto que presentaría un núcleo (panel derecho). Créditos: González et al. (2018).

dieran ser explicadas por el modelo Λ -Materia Oscura Fría (Λ -CDM, por sus siglas en inglés). Sin embargo, a lo largo de los años se han encontrado inconsistencias con las predicciones de dicho modelo cosmológico, algunas de las cuales serían:

- el denominado *Missing Satellite Problem* (Klypin et al., 1999; Moore et al., 1999), esto es, los modelos de CDM predicen ~ 300 satélites dentro de un radio de 1.5 Mpc, mientras que en el GL sólo se observan ~ 100 en ese radio;
- el denominado *Core/Cusp Problem* (Dubinski & Carlberg, 1991), esto es, si las partículas de CDM dominan la formación de la estructura, entonces las galaxias debieran estar inmersas en halos de materia oscura que sigan perfiles caracterizados por *cusps*, en lugar de *cores* que es lo que se observa;
- la existencia de planos de satélites bien definidos como los observados en el GL, los cuales se encuentran en sólo 5–10 % de los sistemas simulados (Pawlowski et al., 2013).

Así como han surgido discrepancias, a lo largo de los años también se han realizado esfuerzos por intentar salvarlas. Por ejemplo, recientemente, a partir de la simulación FIRE-2, Samuel et al. (2020) han encontrado que si bien los planos similares a los que definen las galaxias satélites de la Vía Láctea son poco comunes en dicha simulación, surgen planos delgados en un 1–2 % de los casos a $z = 0-0.2$ y planos dinámicamente coherentes en un 5 % de los casos. Estos planos sobrevivirían menos de 500×10^6 años. En aquellas situaciones en que el sistema de satélites presenta una galaxia similar a la Nube Mayor de Magallanes, la formación de planos podría aumentar hasta un 7–16 % de los casos y sobrevivirían por $0.7-3 \times 10^9$ años. En este sentido, los autores de este trabajo mencionan que esta mejora en los modelos muestra que la obtención de planos de satélites no representa un gran desafío para la cosmología Λ -CDM.

En cuanto al denominado *Missing Satellite Problem*, es de destacar el resultado obtenido por Homma et al. (2019) quien, a partir de datos observacionales, estima una sobreabundancia de galaxias satélites de la Vía Láctea, en lugar de una deficiencia, con respecto a lo predicho por el modelo Λ -CDM.

Por último, con respecto al denominado *Core/Cusp*

Problem y a partir de simulaciones numéricas de alta resolución, Boldrini et al. (2020) encuentran que si la materia oscura en galaxias de baja masa es una combinación de agujeros negros primordiales y CDM, el calentamiento dinámico de esta última por los primeros induciría una transición de *cusp* a *core* en el perfil de materia oscura total. El tiempo de escala de esta transición sería de entre 1 y 8×10^9 años.

Por todo lo expuesto, en una cosmología Λ -CDM, las galaxias dSph del GL serían más consistentes con galaxias primordiales que con galaxias de origen tidal, si bien hay una considerable discusión al respecto. ¿Pero qué sucede, por ejemplo, con las UDGs detectadas en el cúmulo de Coma?

Se ha propuesto que las UDGs, que son galaxias LSB muy extendidas y que no presentan subestructuras de alto brillo superficial (como sí lo muestran las galaxias tipo Malin), podrían ser galaxias tipo Vía Láctea “fallidas” u “oscuras” (van Dokkum et al., 2015). Esto significa que serían galaxias que residen en un halo masivo de materia oscura pero que despliegan luminosidades/masas de galaxia enana. Esto ocurriría porque estas galaxias no han podido desarrollar su población estelar en forma normal debido a diferentes procesos físicos como ser *feedback* extremo por supernovas y estrellas jóvenes, gas *stripping* o la acción de núcleos activos. Si esta hipótesis es correcta, es de esperar que estas galaxias “fallidas” se encuentren dominadas por materia oscura para poder explicar su existencia en medioambientes densos. También sería de esperar que mostraran sistemas de CGs similares a los que muestra la Vía Láctea.

4.2. Desafíos del estudio de las galaxias LSB

Como ejemplo de la complejidad del estudio de las galaxias LSB y de la dificultad para determinar el origen físico de estos objetos, podemos mencionar el caso de la galaxia Dragonfly 44 (D44), ubicada en el cúmulo de Coma.

En el contexto de los diferentes escenarios de formación de las galaxias LSB mencionados en la Sección 4.1, D44 sería una galaxia brillante “fallida”. Dado que es la galaxia más extensa y la segunda más brillante encontrada en el relevamiento Dragonfly, van Dokkum et al. (2016) obtienen para ella un espectro con relación señal-ruido (S/N) de 21 por elemento de resolución, luego de más de 30 horas de integración. A partir de dicho espectro, los autores logran medir la velocidad radial de D44 confirmando que es miembro de Coma y, a partir de su dispersión de velocidades, obtienen para esta galaxia una relación M/L alta, confirmando que se trataría de un objeto dominado por materia oscura. Además, a partir de fotometría obtenida con los telescopios Gemini, detectan una población de 94 candidatos a CGs, lo cual también avalaría el escenario de galaxia luminosa “fallida”.

Algunos años después, y luego de 17 horas de integración sobre la fuente con el instrumento KCWI montado en el telescopio Keck II, van Dokkum et al. (2019) obtienen para D44 espectroscopía con resolución espacial optimizada para el estudio de galaxias LSB, y encuentran que esta galaxia no presenta rotación. Este aspecto

resulta llamativo si se tiene en cuenta que D44 es una de las UDGs más achatadas que se ha identificado en Coma. Estos autores rectifican el valor de la dispersión de velocidades de D44 respecto del trabajo anterior de 47 km seg^{-1} a 33 km seg^{-1} , y también actualizan su relación M/L de 48 a 26 dentro de $1 r_{\text{eff}}$. Sin embargo, mencionan que no descartan que estos nuevos valores se encuentren aún afectados por sistematicidades. De acuerdo a este estudio, D44 estaría dominada por materia oscura en toda su extensión, incluyendo las escalas más pequeñas muestreadas por los datos.

Sin embargo, a partir de estudios en rayos-X, Bogdán (2020) concluye que D44 no sería una galaxia tipo Vía Láctea “fallida” debido a que este objeto no es detectado por el observatorio Chandra. Este hecho descartaría de plano la posibilidad de que D44 resida en un halo masivo de materia oscura. De acuerdo a este autor, las galaxias UDGs serían, en realidad, galaxias enanas con tamaños extendidos debido a que han experimentado un proceso de *feedback* estelar energético. En contraposición, y más recientemente, Villaume et al. (2021) postulan que D44 habría experimentado un episodio intenso de formación estelar en un sentido *inside-out*, y que luego esa formación estelar fue catastróficamente detenida en una etapa temprana y en forma mucho más rápida de lo que se esperaría en una galaxia enana típica.

Con respecto a los casos analizados en el grupo de investigación SEEC, al menos por el momento no podemos decir mucho acerca de su posible origen. Sí, quizás, es de destacar que en el mapa de color ($g'-r'$) de una de las galaxias LSB identificadas en HCG 44 detectamos una estructura, también LSB, que pareciera conectar dicho objeto con la galaxia brillante NGC 3189/3190, que se encuentra ubicada en su proximidad. En el caso de que esta estructura fuera real y no un artefacto, daría indicio de un origen tidal para dicho objeto, a partir de la interacción que NGC 3189/3190 se encuentra experimentando con otros miembros del grupo.

El siguiente paso para el análisis de nuestros objetos en HCG 44 y Pegasus I sería obtener datos espectroscópicos que nos permitan determinar sus velocidades radiales y, de esta manera, confirmar o descartar su pertenencia a los distintos grupos estudiados. Sin embargo, a partir del uso de las calculadoras de tiempo de integración del Observatorio Gemini^{***}, para los brillos superficiales centrales que muestran dichos objetos requeriríamos de un tiempo de integración sobre la fuente de, al menos, 10 horas para obtener espectros de $S/N \sim 9 \text{ pix}^{-1}$. Este hecho, así como lo anteriormente expuesto para objetos similares en otros entornos, demuestra que el estudio de las galaxias de bajo brillo superficial, tanto desde el punto de vista fotométrico como espectroscópico, representa aún hoy en día un verdadero desafío, a pesar de los grandes avances tecnológicos que han tenido lugar en las últimas décadas en el campo de la astronomía.

Agradecimientos: Quisiera agradecer al Comité Científico de la 62a Reunión Anual de la Asociación Argentina de Astronomía

^{***}<http://www.gemini.edu/instrumentation/gmos/exposure-time-estimation>

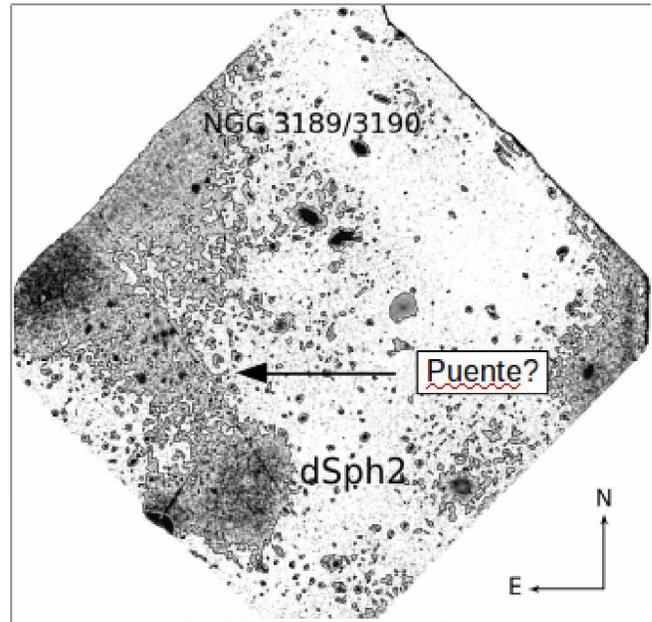


Figura 8: Mapa ($g'-r'$) construido a partir de imágenes Gemini-GMOS del grupo HCG 44 donde se visualiza lo que podría ser una estructura LSB que vincula a la galaxia brillante NGC 3189/3190 con una de las galaxias LSB detectadas en dicho grupo. Crédito: Smith Castelli et al. (2016).

por haberme invitado a presentar este informe. Este trabajo ha sido financiado con aportes del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la República Argentina, y de la Universidad Nacional de La Plata (Argentina). Las imágenes presentadas en las Figs. 1 y 2 no han sido modificadas (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). El SDSS-III ha sido financiado por la Fundación Alfred P. Sloan, las Instituciones Participantes, la *National Science Foundation* y el *U.S. Department of Energy Office of Science*. El sitio web del SDSS-III es <http://www.sdss3.org/>. El SDSS-III es administrado por el Consorcio de Investigación Astrofísica para las Instituciones Participantes de la Colaboración SDSS-III que incluyen la Universidad de Arizona, el Grupo Participante de Brasil, el Laboratorio Nacional Brookhaven, la Universidad Carnegie Mellon, la Universidad de Florida, el Grupo Participante de Francia, el Grupo Participante de Alemania, la Universidad de Harvard, el Instituto de Astrofísica de Canarias, el Grupo Participante del Estado de Michigan/Notre Dame/JINA, la Universidad Johns Hopkins, el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, el Instituto de Astrofísica Max Planck, el Instituto de Física Extraterrestre Max Planck, la Universidad Estatal de Nuevo México, la Universidad de Nueva York, la Universidad Estatal de Ohio, la Universidad Estatal de Pennsylvania, la Universidad de Portsmouth, la Universidad de Princeton, el Grupo Participante de España, la Universidad de Tokyo, la Universidad de Utah, la Universidad de Vanderbilt, la Universidad de Virginia, la Universidad de Washington y la Universidad de Yale.

Referencias

- Bogdán Á., 2020, *ApJL*, 901, L30
 Boldrini P., et al., 2020, *MNRAS*, 492, 5218
 Borthakur S., Yun M.S., Verdes-Montenegro L., 2010, *ApJ*, 710, 385
 Bothun G.D., et al., 1987, *AJ*, 94, 23
 Brown T.M., et al., 2014, *ApJ*, 796, 91
 Cantiello M., et al., 2007, *ApJ*, 668, 130
 Cole A.A., 2019, K.B.W. McQuinn, S. Stierwalt (Eds.), *Dwarf Galaxies: From the Deep Universe to the Present*,

- vol. 344, 29–37
Collins M.L.M., et al., 2013, *ApJ*, 768, 172
Collins M.L.M., et al., 2014, *ApJ*, 783, 7
Dubinski J., Carlberg R.G., 1991, *ApJ*, 378, 496
González N.M., et al., 2018, *A&A*, 620, A166
Hickson P., 1982, *ApJ*, 255, 382
Homma D., et al., 2019, *PASJ*, 71, 94
Klypin A., et al., 1999, *ApJ*, 522, 82
Kroupa P., 2012, *PASA*, 29, 395
Laevens B.P.M., et al., 2015, *ApJ*, 813, 44
Martin N.F., et al., 2015, *ApJL*, 804, L5
McConnachie A.W., 2012, *AJ*, 144, 4
Moore B., et al., 1999, *ApJL*, 524, L19
Pawlowski M.S., Kroupa P., Jerjen H., 2013, *MNRAS*, 435, 1928
Peñarrubia J., et al., 2014, *MNRAS*, 443, 2204
Saburova A.S., et al., 2019, *MNRAS*, 489, 4669
Samuel J., et al., 2020, arXiv e-prints, arXiv:2010.08571
Sandage A., Binggeli B., 1984, *AJ*, 89, 919
Serra P., et al., 2013, *MNRAS*, 428, 370
Smith Castelli A.V., Faifer F.R., Escudero C.G., 2016, *A&A*, 596, A23
Tonry J.L., et al., 2001, *ApJ*, 546, 681
Torrealba G., et al., 2019, *MNRAS*, 488, 2743
van Dokkum P., et al., 2016, *ApJL*, 828, L6
van Dokkum P., et al., 2019, *ApJ*, 880, 91
van Dokkum P.G., et al., 2015, *ApJL*, 798, L45
Villaume A., et al., 2021, arXiv e-prints, arXiv:2101.02220
Williams B.A., McMahon P.M., van Gorkom J.H., 1991, *AJ*, 101, 1957