

EL RESPLANDOR DE LAS TINIEBLAS

Guiados por la misma curiosidad que movió a nuestros antepasados por saber qué había más allá de la siguiente montaña, por conocer qué se escondía tras el siguiente valle, los astrónomos de todas las épocas hemos intentado vislumbrar, con la tecnología de cada momento, lo que se oculta tras la oscuridad de la noche. En el primer cuarto del siglo XXI, la tecnología y los nuevos métodos de observación nos han permitido dar un salto de gigante en nuestro empeño por sacar a la luz estructuras de brillo superficial tan débiles que eran impensables tan sólo hace unas pocas décadas. Este texto pretende describir dónde estamos y qué nos puede deparar el futuro más cercano en este campo.



Ignacio Trujillo
Instituto de Astrofísica de Canarias
trujillo@iac.es

Durante milenios, la humanidad ha visto limitada su visión de la noche a las capacidades que proporciona el ojo desnudo. Maravillosa herramienta que proporciona la naturaleza, el ojo humano es capaz de detectar contrastes en la oscuridad de la noche bastante sorprendentes. De hecho, la visión de nuestros ojos nos permite ver el centro de las galaxias más cercanas, cuyo brillo superficial está en torno a 16 mag/arcsec^2 . Aun así, tuvimos que esperar a la revolución tecnológica del s. XVI para que, gracias al uso del telescopio, nuestra especie diera un salto de gigante en la exploración de los cielos. De este modo, con las continuas mejoras en los telescopios y la invención de las cámaras CCD se consiguió que a principio del siglo XXI tuviéramos observaciones rutinarias de todo el cielo (p.e. el SDSS) alcanzando brillos superficiales tan débiles como $26.5 \text{ mag/arcsec}^2$. Es decir, en cuatro siglos, habíamos conseguido un incremento en sensibilidad de un factor 10.000 respecto a las capacidades del ojo humano.

Antes de la época de los grandes cartografiados, trabajos pioneros, como los llevados a cabo por David Malin usando placas fotográficas, nos habían enseñado que podían alcanzarse brillos superficiales en las imágenes todavía dos magnitudes más débiles que los obtenidos por el SDSS. Motivados por estos trabajos, algunos equipos de astrónomos, como el liderado por David Martínez Delgado, consiguieron fotografiar el cielo hasta alcanzar brillos superficiales cercanos a 29 mag/arcsec^2 (cien mil veces más profundo que el ojo desnudo). La frontera de las 30 mag/arcsec^2 , sin embargo, sólo se ha podido traspasar en los últimos años gracias al uso de telescopios de la clase 8-10m y tras muchas horas de integración [1]. En la figura 1, mostramos la comparativa entre imágenes de dos galaxias obtenidas con el telescopio Sloan y con el telescopio LBT exhibiendo el progreso en profundidad en los últimos 20 años.

Las imágenes muy profundas nos están revelando una visión del cielo nocturno bastante sorprendente. Casi sin excepción, cualquier lugar al que apuntemos nuestros telescopios está contaminado por la presencia de cirros de polvo de nuestra propia galaxia. Esta contaminación se da incluso a latitudes galácticas altas debido a la presencia de

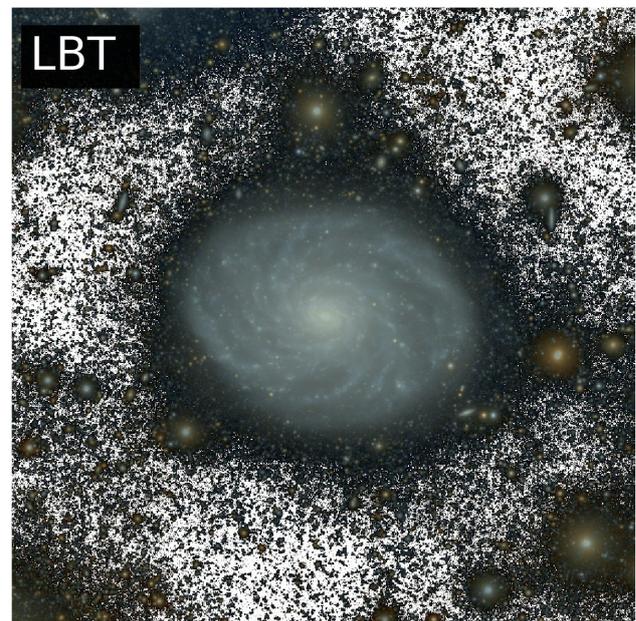
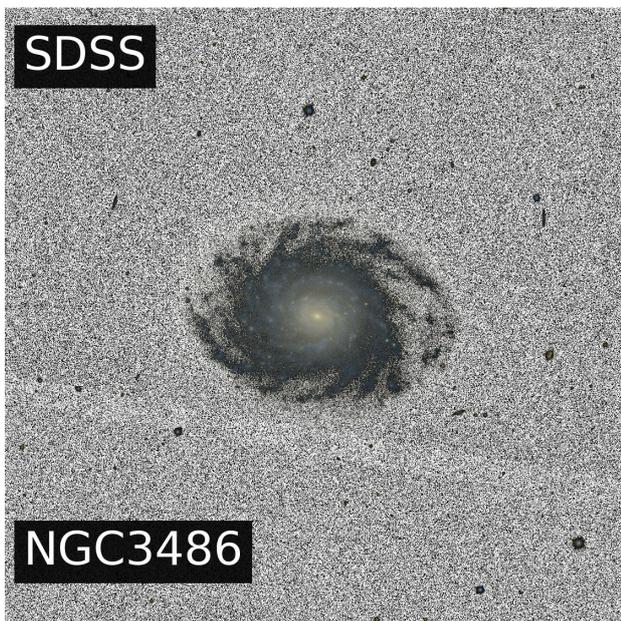
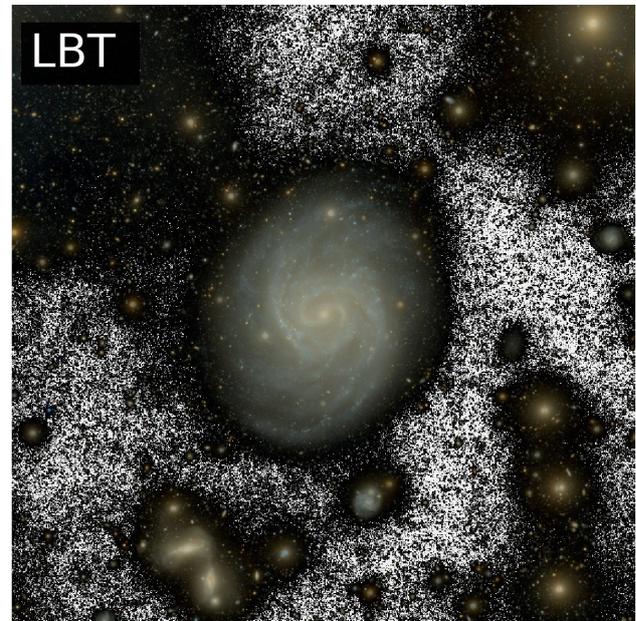
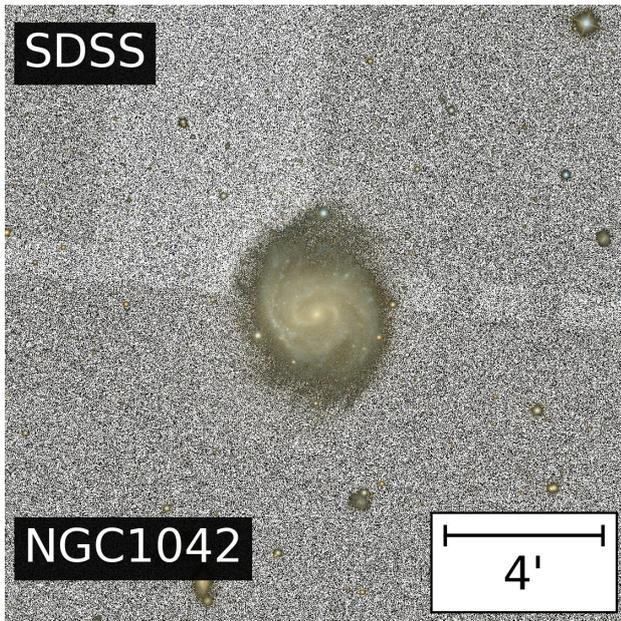


Figura 1. La imagen muestra el salto en profundidad ganado en los últimos 20 años para dos galaxias similares a M33 (NGC1042 y NGC3486). La columna de la izquierda corresponde a las imágenes del SDSS de estos objetos, mientras que la columna de la derecha muestra cómo se observan estas galaxias usando el Large Binocular Telescope (LBT). La profundidad de las imágenes de la derecha es similar a la que se espera obtener con el cartografiado LSST del telescopio Vera Rubin. Crédito Giulia Golini.



Figura 2. Grupo de cirros galácticos encontrado en el cartografiado Stripe82, tras ser procesado con las técnicas de nuestro grupo [3]. Estas sutiles estructuras de polvo del medio interestelar tienen unos colores ópticos que son diferentes a las poblaciones estelares de las galaxias [2]. Debido a esta propiedad es posible identificarlos y enmascararlos en las imágenes profundas. Crédito Javier Román.

gigantescas columnas de polvo cercanas a nuestra vecindad solar. En los últimos años nuestro grupo ha trabajado profusamente en el problema del polvo y como caracterizarlo para evitar que sus estructuras de bajo brillo sean confundidas con estructuras extragalácticas [2]. La figura 2 nos muestra una región de polvo de nuestra propia galaxia. Afortunadamente, todo parece indicar que los colores ópticos de los cirros de la Vía Láctea son diferentes de los colores de las poblaciones estelares de las galaxias lejanas. De esta forma, con una buena combinación de colores ópticos, podemos identificar el polvo de nuestra galaxia y, eliminar así, estas estructuras de bajo brillo de nuestros cartografiados.

Desde el punto de vista de la astrofísica extragaláctica, nuestras imágenes más profundas nos están permitiendo, por primera vez, estudiar en detalle varias cuestiones hasta la fecha inaccesibles. Algunos

ejemplos de estas cuestiones son: ¿tienen las galaxias un borde definido?, ¿hay un límite a la masa y brillo superficial de las galaxias de más baja masa que pueden formarse? y, por último, ¿cuál es la estructura y cantidad de masa estelar en los halos alrededor de las galaxias más masivas? Todas estas preguntas están profundamente imbricadas con la formación de las galaxias y, por tanto, con el modelo cosmológico del Universo. En lo que sigue haré un breve resumen de los recientes avances en estas líneas de investigación.

EL BORDE DE LAS GALAXIAS

¿Tiene sentido hablar de borde de las galaxias? Las galaxias no parecen tener un borde claro, siempre es posible encontrar una estrella si miramos un poco más allá. Entonces, ¿a qué nos referimos cuando hablamos de encontrar el borde de las galaxias? Tanto los modelos teóricos como las observaciones sugieren que hay una densidad de gas mínima necesaria

para poder activar la formación estelar y, por tanto, la generación de nuevas estrellas. Este umbral para la formación estelar generaría poblaciones estelares con densidades del orden de $1 M_{\odot}/\text{pc}^2$. Para explorar estas densidades es necesario obtener imágenes que nos permitan caracterizar brillos superficiales más débiles que $27 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$. Con los nuevos cartografiados de gran campo (Stripe82, DECaLS, HSC SSP, etc.) podemos explorar los perfiles de miles de galaxias hasta estos brillos superficiales y, por lo tanto, investigar estos potenciales “truncamientos” en la distribución de masa de las galaxias. Esto, además, de forma natural, nos permite proponer una forma de medir el tamaño de las galaxias que esté asociada al umbral para la formación de estrellas.

Recientemente hemos investigado esta cuestión usando las imágenes profundas del cartografiado Stripe82 (<http://research.iac.es/proyecto/stripe82/>). Hemos encontrado que, con la anterior definición de tamaño motivada físicamente [4], la relación de escala de las galaxias entre la masa y el tamaño se vuelve espectacularmente estrecha ($\sigma \sim 0.06 \text{ dex}$). Este resultado además se encuentra en las simulaciones cosmológicas de galaxias. Esto nos permite, por primera vez, utilizar el tamaño de una galaxia para inferir con precisión la cantidad de masa en el halo de materia oscura que contiene a dicho objeto. Se abre, por tanto, una nueva puerta observacional para explorar la materia oscura alrededor de las galaxias.

LAS GALAXIAS DE MÁS BAJA MASA

En astronomía extragaláctica es bien conocido el problema de los “satélites perdidos”. Este problema surge de la fuerte discrepancia entre el número de satélites de baja masa que se localizan alrededor de la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda (M31) frente al mayor número de subhalos de materia oscura encontrado en las simulaciones cosmológicas. Esta discrepancia lleva varias décadas siendo fuente de grandes debates en la comunidad. Aunque se han propuesto muchas explicaciones para resolver este problema, es sólo en este momento cuando las imágenes profundas nos están permitiendo ampliar la búsqueda de satélites muy débiles alrededor de otras galaxias que no sean la nuestra y M31. Esto nos posibilita ver si el problema de los satélites perdidos es una anomalía de nuestro grupo Local o si, por el contrario, es un problema universal que requiere un estudio muy detallado.

Los cartografiados profundos actuales nos permiten explorar los satélites de baja masa ($10^6 M_{\odot}$) de las galaxias cercanas ($< 10 \text{ Mpc}$). Nuestro grupo de investigación está intentando dar un paso más allá usando el telescopio LBT. Como muestra la figura 1, estamos observando galaxias similares a nuestra Vía Láctea hasta distancias mayores (20 Mpc). Estas imágenes muy profundas con el LBT nos permiten explorar objetos de masas tan bajas como $10^5 M_{\odot}$ (e.d. la masa de un cúmulo globular) alrededor de estas galaxias. Esto nos va a permitir tener una caracterización muy fina del problema de los satélites perdidos y su relación con las propiedades de las galaxias anfitrionas.

En el camino por detectar objetos cada vez menos masivos y más débiles nos hemos encontrado con un “nuevo” tipo de objetos llamados “galaxias ultra-difusas” (o UDGs en inglés). Estas galaxias han sido fuente de una enorme controversia debido a resultados donde se han indicado que las UDGs son o bien extraordinariamente masivas en términos de materia oscura o bien que carecen de ella. Debido a la excepcional atención que han provocado en la comunidad recientemente, conviene dedicar un poco de tiempo a entender mejor la naturaleza de estas galaxias.

GALAXIA ULTRA-DIFUSAS

Las UDGs son galaxias con una masa estelar de $\sim 10^8 M_{\odot}$, brillo superficial central más débil que $24 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ y con un radio efectivo mayor que 1.5 kpc [5]. Este radio efectivo es bastante mayor que el esperado ($< 1 \text{ kpc}$) para galaxias de masa similar. Objetos como éstos se conocen desde los años 80 del siglo XX, pero no fue hasta 2015 cuando un grupo de astrónomos de la Universidad de Yale publica un artículo donde encuentran decenas de estos objetos en el cúmulo de galaxias de Coma. Cautivados por el sugerente título de la publicación: *Cuarenta y siete galaxias extremadamente difusas del tamaño de la Vía Láctea en el cúmulo de Coma*, la comunidad se volcó al análisis de tan misteriosos objetos, grandes como nuestra galaxia, pero de muy bajo brillo superficial. ¿Estaríamos ante un nuevo tipo de galaxias, muy abundantes, pero hasta ahora invisibles para nuestros telescopios?

Es interesante notar que la clave por la que el anterior artículo llamó tanto la atención no es tanto por el brillo superficial de estos objetos, si no por la afirmación de que las UDGs tienen el *tamaño* de la

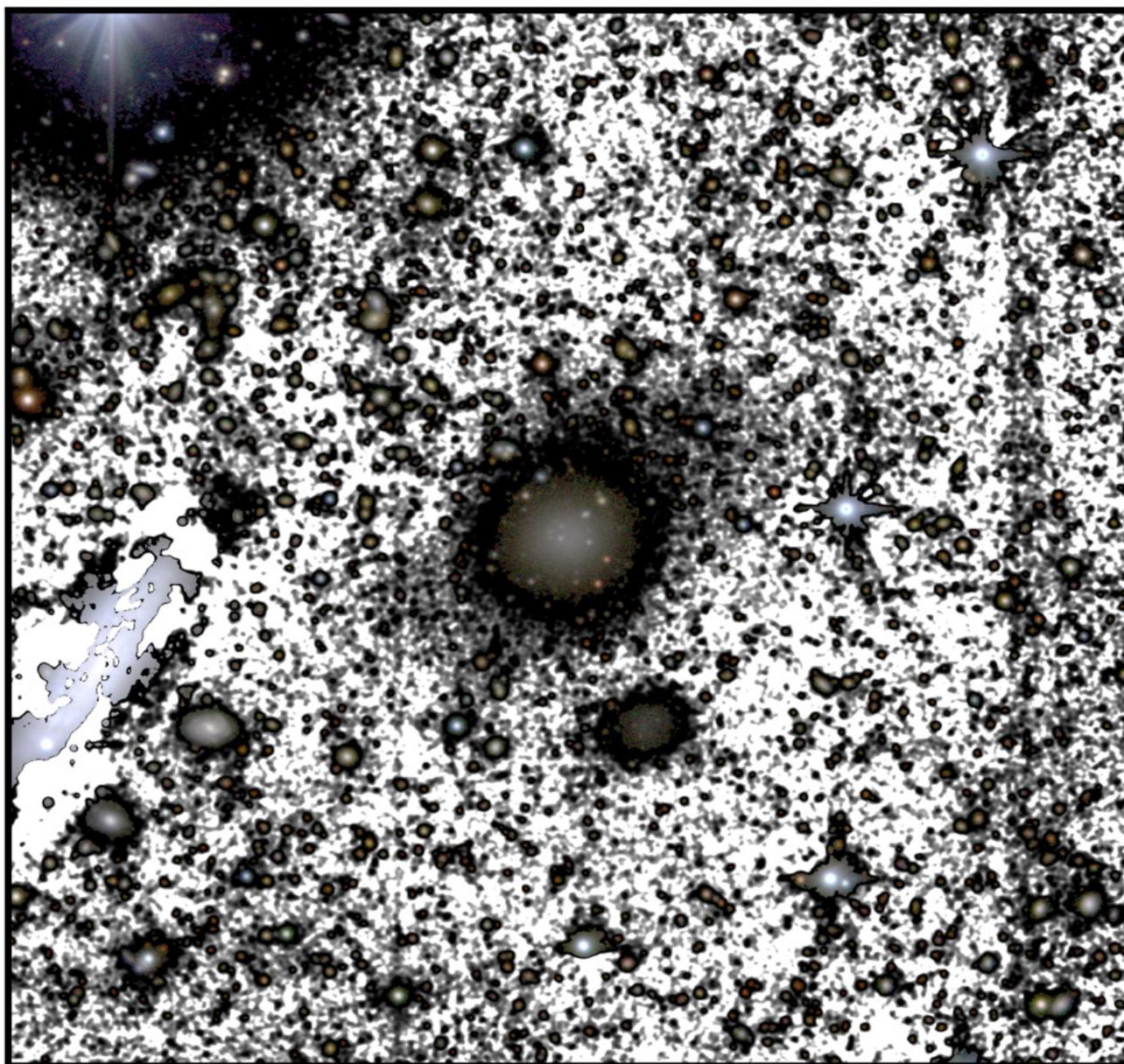


Figura 3. Imagen muy profunda de la galaxia UDG DF4 obtenida con el telescopio IAC80 en el observatorio del Teide [11]. La imagen es el resultado de un total de unas 60h de integración con este telescopio. La forma en S alrededor de la galaxia se corresponde a las colas de marea de las estrellas que están siendo arrancadas por la galaxia vecina NGC1035. Esta galaxia, a la izquierda de DF4, se ha sustraído de las imágenes para poder facilitar la observación de las colas de marea que han arrancado la materia oscura de este objeto y que en la actualidad están arrancando las estrellas de la periferia de la galaxia enana. Crédito Mireia Montes.

Vía Láctea. Hay ejemplos de satélites de nuestra galaxia y M31 con brillo superficial más bajo que los que presentan las UDGs, sin embargo, ninguno de estos satélites tiene un radio efectivo tan grande. Por lo tanto, es muy importante incidir en el concepto de tamaño de las galaxias para entender bien la naturaleza de las UDGs. Cuando vamos a los detalles, lo que vemos es que el tamaño de las UDGs se mide utilizando el radio efectivo. El radio efectivo (radio que contiene la mitad de la luz) es una forma de medir el tamaño de las galaxias que se ha popularizado en las últimas dos décadas. Esto se debe a su multitudinario uso para describir las galaxias en grandes cartografiados como el SDSS. Sin embargo, es precisamente ese uso intensivo el que ha hecho de alguna forma olvidar qué es lo que realmente describe el radio efectivo de un objeto. En realidad, este *tamaño* no nos habla de cómo es la extensión de una galaxia, si no de cómo de concentrada está la luz en ella. Por ejemplo, es bien conocido que nuestra galaxia tiene una extensión radial de al menos 25 kpc (estando nuestro Sol a 8.1 kpc del centro). Sin embargo, su radio efectivo (debido a la presencia del bulbo) es tan pequeño como unos 4 kpc. Por lo tanto, si quisiéramos caracterizar el *tamaño* de la Vía Láctea usando su radio efectivo, llegaríamos a la conclusión de que es una galaxia muy pequeña y, por lo tanto, comparable con estas galaxias difusas. De hecho, en las UDGs (debido a la falta de concentración de luz en el centro) sucede precisamente lo contrario. El radio efectivo de una UDG es tan “grande” porque su luz no se concentra hacia el centro. Cuando usamos otras medidas del tamaño para caracterizar las galaxias (como la propuesta anteriormente basada en el umbral de la formación estelar u otras como la tradicional localización de la isofota de 25 mag/arcsec²) entonces las UDGs tienen el mismo tamaño que las galaxias enanas [6].

Las UDGs, sin embargo, también han sido noticia en los medios por su excepcional contenido en materia oscura. Por ejemplo, la galaxia DF44 fue portada de las revistas de divulgación por tener un 99.99% de su masa en forma de materia oscura. Un reanálisis cuidadoso de los datos ha demostrado, sin embargo, que ese valor estaba tremendamente exagerado y que su contenido en materia oscura es compatible con las galaxias enanas de su misma masa estelar [7]. Otras dos galaxias UDGs muy famosas, esta vez

por su aparente ausencia de materia oscura, son DF2 y DF4 [8, 9]. En el caso de DF2 el misterio se resolvió porque se había sobreestimado significativamente la distancia [10]. Mientras que en el caso de DF4, tuvimos que esperar a tener imágenes muy profundas para resolver el enigma. En un trabajo liderado por Mireia Montes [11] se combinaron imágenes tomadas con el GTC, el HST y más de 60h con el IAC80 para explorar en detalle este objeto. En la figura 3 podemos ver la imagen tomada con el IAC80 donde se aprecian de forma clara las colas de mareas en forma de S que rodean a esta galaxia. Esta imagen es uno de los primeros ejemplos visuales de cómo se arranca la materia oscura en las galaxias. Las fuerzas de marea han eliminado primero la materia oscura y ahora se está procediendo al arranque de las estrellas en las partes más externas. Con el tiempo, este objeto terminará siendo completamente despedazo y absorbido por la galaxia cercana NGC1035.

El resumen por tanto de lo que hemos aprendido con respecto a las galaxias UDGs es que son galaxias enanas normales con una formación estelar muy disminuida. La baja tasa de formación estelar explica su bajo brillo superficial. Este bajo brillo ha impedido que las hubiéramos detectado en los catálogos previos de galaxias enanas. Los estudios de galaxias enanas antes del estudio de las UDGs estarían, por tanto, sesgados hacia la población de objetos más activa y brillante.

LOS HALOS ESTELARES DE LAS GALAXIAS MÁS MASIVAS

Para terminar, podemos hablar brevemente de los avances respecto a la detección de los halos estelares que, según el modelo cosmológico, deberían rodear las galaxias masivas. Esta predicción del modelo cosmológico aparece como resultado de la formación jerárquica de las galaxias. Por lo tanto, si estos halos no se detectaran alrededor de galaxias como la nuestra o con masas mayores, el modelo de formación de galaxias tendría que ser revisado en profundidad. Las simulaciones cosmológicas indican que estos halos deberían observarse casi de forma ubicua si las imágenes permiten el análisis de estructuras de brillo superficial más débiles que 30 mag/arcsec².

La estructura de estos halos estelares es una mezcla de una componente suave con forma esferoidal, sobre la que suelen encontrarse estructuras filamentosarias en forma de corrientes de estrellas con un brillo

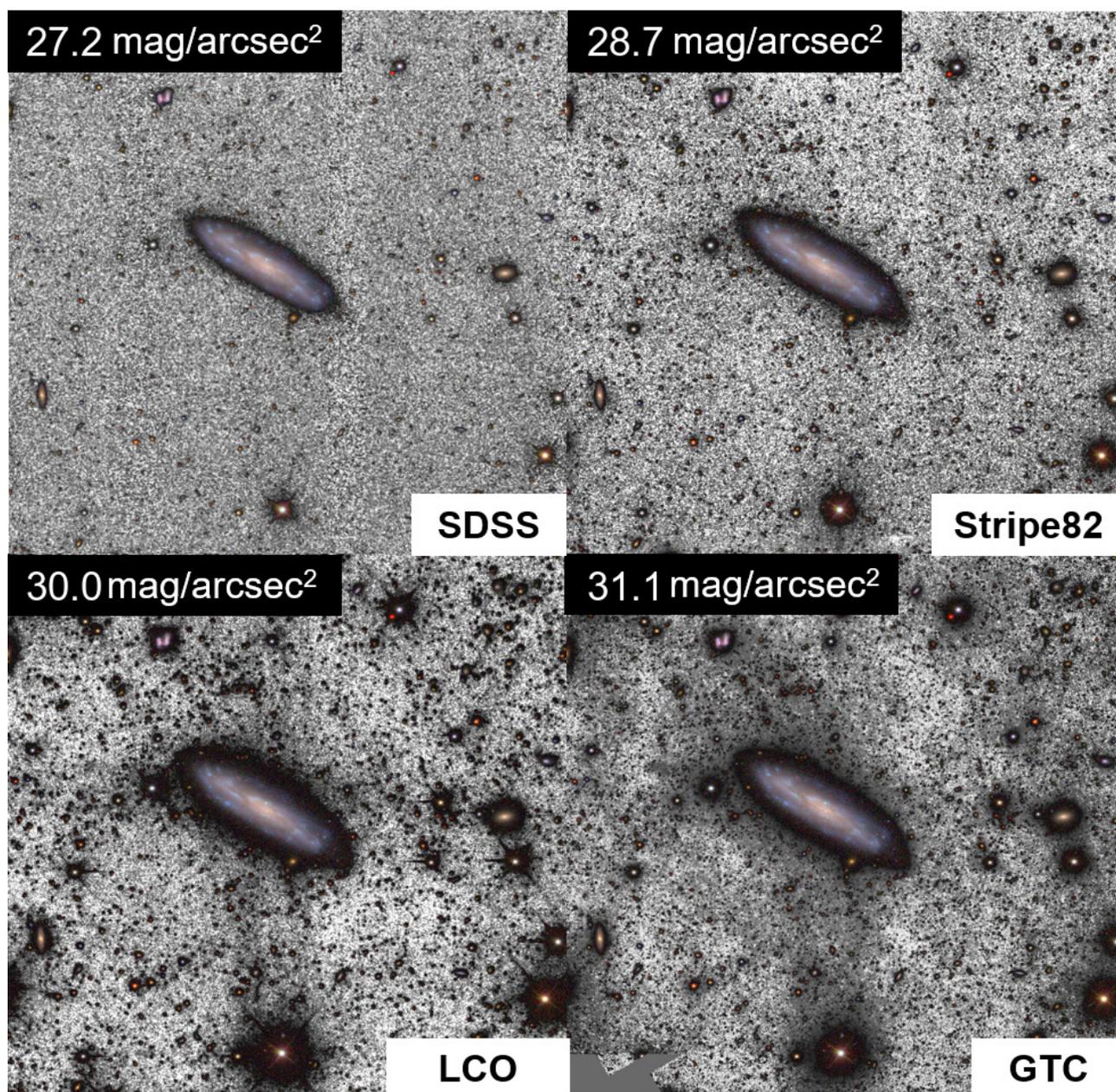


Figura 4. Efecto de la profundidad en la detección de los halos estelares que rodean las galaxias. Las imágenes se corresponden a la observación de la galaxia NGC493 (similar a M33) usando diferentes telescopios. La diferente profundidad de las imágenes se indica en cada panel. La estructura del halo estelar sólo empieza a ser evidente cuando las imágenes alcanzan brillos superficiales cercanos a 30 mag/arcsec² o más débiles. Este es el caso del telescopio de las Cumbres tras unas 50h, o el telescopio GTC tras 5h de integración. Crédito Raúl Infante-Sainz.

superficial mayor. En algunas ocasiones estos filamentos son bastante brillantes y su brillo superficial relativamente alto ($\sim 25\text{-}27$ mag/arcsec²), lo cual nos permite detectarlos en imágenes tomadas con telescopios modestos. Un ejemplo icónico es la corriente que circunda la galaxia NGC5907 [12]. Sin embargo, este tipo de ejemplos son la minoría, y la mayoría de las galaxias no revelan ningún tipo de estructura en los cartografiados profundos actuales. Por este motivo, es necesario dedicar tiempo en los telescopios más grandes para poder explorar la predicción del modelo cosmológico de forma sistemática. Un ejemplo de lo que podemos hacer hoy en día se presenta en la figura 4, donde se ha observado una galaxia como M33 usando varios telescopios y tiempos de exposición. Como podemos ver, es sólo cuando llegamos a niveles de brillo superficial cercanos a 30 mag/arcsec² cuando la estructura filamentaria alrededor de la galaxia se vuelve visible.

CONCLUSIÓN

Estamos viviendo una revolución en la astronomía de bajo brillo superficial. En las últimas dos décadas hemos mejorado cerca de un factor 100 nuestra capacidad de detectar estructuras de bajo brillo superficial. Esto representa una sensibilidad un millón de veces mayor que la proporcionada por el ojo desnudo. Los nuevos cartografiados de todo el cielo que se están planeando tanto desde tierra (LSST) como desde el espacio (Euclid, Roman) nos permitirán acceder a grandes regiones del cielo a profundidades (>30 mag/arcsec²) que hasta ahora sólo están al alcance de nuestros grandes telescopios y en regiones del cielo muy limitadas. Se abre por lo tanto una época que promete descubrimientos en casi todos los ámbitos de la astronomía: desde el sistema solar (con el estudio de la luz Zodiaca), el medio interestelar (cirros galácticos), galaxias de muy bajo brillo superficial (galaxias “oscuras”) hasta la luz intracumular de los grandes cúmulos de galaxias. Sin duda, un tiempo fascinante para la investigación de las fuentes de luz más tenue que nos regala la Naturaleza.

REFERENCIAS

- [1] Trujillo, I & Fliri, J., 2016, ApJ, 823, 123
- [2] Román, J, Trujillo, I. & Montes, M., 2020, A&A, 644, 42
- [3] Fliri, J. & Trujillo, I., 2016, MNRAS, 456, 1359
- [4] Trujillo, I, Chamba, N. & Knapen, J. H., 2020, MNRAS, 493, 87
- [5] van Dokkum, P. G., et al., 2015, ApJ, 798, L45
- [6] Chamba, N., Trujillo, I., & Knapen, J. H., 2020, A&A, 633, L3
- [7] Saifollahi, T., et al., 2021, MNRAS, 502, 5921
- [8] van Dokkum, P. G., et al., 2018, Nature, 555, 629
- [9] van Dokkum, P. G., et al., 2019, ApJ, 874, L5
- [10] Trujillo I., et al., 2019, MNRAS, 486, 1192
- [11] Montes, M., et al., 2020, ApJ, 904, 114
- [12] Martinez-Delgado, D., 2008, ApJ, 689, 184