

La Evolución de la Forma y Estructura de las Galaxias: ¿Cómo eran hace 6 mil millones de años?

Dr. Rodney Delgado-Serrano

Laboratorio GEPI, Francia

Introducción

Las galaxias son objetos complejos que contienen algunas decenas de billones de estrellas y pueden ser clasificadas por su forma y estructura siguiendo la secuencia de Hubble. Ésta se define por un diagrama que permite distribuir las galaxias locales en diferentes grupos. Los cuatro grupos principales son: elípticas, lenticulares, espirales e irregulares. A su vez, cada uno de estos grupos se subdivide dependiendo de otras características más específicas.

Sin embargo, ¿cómo era la secuencia de Hubble en el pasado? Ésta es una pregunta que no ha sido contestada aún. Para ello, se necesitan imágenes suficientemente profundas que nos permitan revelar las morfologías de las galaxias distantes. van den Bergh [3] señala que una simple inspección de las imágenes más profundas obtenidas por el telescopio espacial Hubble (HST) puede mostrar cómo han evolucionado las morfologías de las galaxias. En efecto, las imágenes profundas del HST/ACS revelan detalles hasta una escala de 200 pc en el caso de las galaxias que se encuentran a $z \sim 1$. Ahora, esto no es suficiente para establecer la secuencia de Hubble en el pasado, puesto que hay que tomar en cuenta otros efectos como, por ejemplo, el “cosmological dimming” y la corrección k. Por otra parte, si bien la relación entre las galaxias del pasado y las galaxias del presente está protegida por el principio cosmológico, tal relación puede haber sido afectada dramáticamente por eventos esporádicos tales como las colisiones galácticas.

De esta forma, la motivación de este estudio es la de establecer la secuencia de Hubble en el pasado y verificar hasta qué precisión ésta puede estar relacionada causalmente a la secuencia de Hubble en el presente. Para ello, se utiliza un criterio de selección único y simple para las dos porciones de corrimiento hacia el rojo estudiadas. Nos hemos interesado, principalmente, en las galaxias de masa intermedia (masa estelar entre 3×10^{10} y 3×10^{11} M) en vista de que éstas albergan entre el 60 y el 85% del total de la masa estelar en el Universo local.

La clasificación morfológica es efectuada utilizando un único, simple y reproducible árbol de decisión. Éste permite que la identificación de peculiaridades en las galaxias distantes pueda ser evaluada directamente a través de la discrepancia entre una galaxia determinada y las galaxias de la secuencia de Hubble local. Otra importancia en la utilización de un tal árbol de decisión es evidente a través de los resultados de Neichel et al. [4], en donde mostramos que, sólo

al utilizar un tal árbol de decisión, existe una concordancia excelente entre la clasificación morfológica y la clasificación cinemática de las galaxias.

De este modo, el presente artículo ha sido organizado de la siguiente manera: (a) presentación de las muestras, (b) análisis morfológico, (c) clasificación morfológica, y (d) resultados y conclusiones. A través de este artículo se adoptan los parámetros cosmológicos con $H_0 = 70$ km s⁻¹ Mpc⁻¹, $\Omega_\Lambda = 0,7$. Las magnitudes están dadas en el sistema AB.

La muestra

Para este estudio se utilizaron dos muestras. La primera, conformada por galaxias locales está construida a partir del Sloan Digital Sky Survey (SDSS). La segunda, conformada por galaxias distantes está construida a partir de The Great Observatories Origins Deep Survey (GOODS). En ambos casos, se utilizó un criterio de selección simple: la magnitud absoluta en banda J ($M_J < -20,3$). Otras restricciones, por razones prácticas, fueron aplicadas. Éstas son las siguientes: (1) cada galaxia debe poseer un espectro de buena calidad que nos permita medir la línea en emisión [OII] $\lambda 3727$; (2) cada galaxia debe constar con imágenes en al menos 3 bandas diferentes, lo cual nos permita construir las imágenes y mapas a color. Sin embargo, estas dos últimas restricciones sólo rechazan objetos en vista de razones técnicas.

I.) La muestra local. Las galaxias locales fueron seleccionadas a partir de la muestra de Fukugita et al. [5]. La misma incluye 2253 galaxias con magnitud Petrosiana menor a $r_P = 16$, y las cuales se encuentran dentro de un área rectangular de 230 grados² en el área ecuatorial del cielo norteño. De esta muestra, sólo se escogieron las galaxias para las cuales existen datos espectroscópicos e imágenes que provienen del SDSS-DR3 [6] [7]. Así, todos los objetos en nuestra muestra tienen imágenes en las bandas u (3551 Å), g (4686 Å), r (6165 Å), i (7481 Å) y z (8931 Å). Las magnitudes relativas fueron recuperadas utilizando los catálogos 2MASS [8] y SDSS-DR3. De esta forma, la muestra quedó reducida a 2113 galaxias. Finalmente, aplicamos nuestro criterio de selección ($M_J < -20,3$) y la restricción (1), quedando con un total de 116 galaxias. Todas ellas con un corrimiento hacia el rojo comprendido entre $0,0207 \leq z \leq 0,030$. Un test Kolmogorov-Smirnov nos permitió comprobar que existe una probabilidad de 98% que esta muestra y la función de luminosidad local provienen de una misma distribución. Por lo tanto, nuestra muestra local es representativa de las galaxias con $M_J < -20,3$ del Universo local.

II.) La muestra distante. Para construir esta muestra se han combinado dos sub-muestras. Una conformada por galaxias activas (“star-forming galaxies”), y la otra por galaxias inactivas (“quiescent galaxies”). En ambos casos, las galaxias fueron seleccionadas de acuerdo a nuestro criterio: $M_J < -20,3$. Además, todas las galaxias en esta muestra poseen un corrimiento hacia el rojo comprendido entre $0,4 \leq z \leq 0,8$. Estos límites fueron aplicados para ser consistentes con Intermediate MAss Galaxy Evolution Sequence survey (IMAGES). Como fue mencionado anteriormente, cada galaxia posee un espectro que incluye la línea [OII] $\lambda 3727$, y posee imágenes en al menos tres bandas (v : 5915 Å, i : 7697 Å, z : 9103 Å) obtenidas por GOODS(HST/ACS) v2.0. Finalmente, esta muestra comprende un total de 143 galaxias distantes.

1 Para una introducción dirigida a todo público, que permita una mejor comprensión del presente artículo, se recomienda leer Delgado-Serrano [1]. Mientras que para un desarrollo más detallado dirigirse a Delgado-Serrano et al. [2].

Galaxias activas distantes: sub-muestra formada por 49 galaxias, originalmente estudiadas por Neichel et al. [4]. Las mismas forman parte de IMAGES. Su representatividad fue verificada mediante un test Kolmogorov-Smirnov. El mismo muestra que esta sub-muestra sigue la misma distribución que la función de luminosidad correspondiente [10] en un 97%. Esto confirma los resultados de Yang et al. [11] y Neichel et al. [4], en donde se muestra que IMAGES es representativo de las galaxias activas distantes.

Galaxias inactivas distantes: Esta sub-muestra complementa la anterior. Fue seleccionada en el área observada por GOODS, y se usaron los datos espectroscópicos provenientes de: (a) observaciones realizadas por VLT/FORS2 – IMAGES [12], (b) observaciones FORS2 en el marco de los programas de la ESO [13][14], (c) observaciones realizadas por VLT/VIMOS [15]. Después de aplicar nuestro criterio de selección y las restricciones (1) y (2), esta sub-muestra quedó formada por 94 galaxias. Un alto porcentaje de las mismas (77%) poseen datos espectroscópicos provenientes de VLT/FORS2, asegurando así una mejor exactitud en la medida del EW([OII]λ3727). Un test Kolmogorov-Smirnov, con una probabilidad de 94 %, muestra que esta sub-muestra y la función de luminosidad correspondiente [10] provienen de la misma distribución.

El análisis morfológico

I.) Comparación de dos muestras. En el presente estudio se quiere comparar la morfología de dos muestras de galaxias que se encuentran a diferentes épocas del Universo. Ambas observadas con dos instrumentos diferentes. Por ende, uno de los principales objetivos es también el de asegurarnos que tal comparación no sea afectada por posibles efectos instrumentales y/o cosmológicos (resolución espacial, profundidad, corrección k). En este sentido, con respecto a los efectos instrumentales, las imágenes HST/ACS poseen un FWHM de 0,108 arsec, lo que corresponde a 0,81 kpc a z=0,65. Mientras que a z = 0,025 las galaxias son observadas por el SDSS con un FWHM promedio de 1,4 arsec, lo que corresponde a 0,74 kpc. Para ambos instrumentos, el tamaño de los pixeles corresponden a una muestra de la PSF de 3,6 y 3,5 pixeles, respectivamente. Por estas razones, la correspondencia del muestreo en unidades físicas es óptima. A ello habría que agregar los resultados obtenidos por Barden et al. [16], quienes utilizando imágenes de galaxias locales observadas por el SDSS, simularon como se verían tales imágenes si hubiesen sido observados por el HST/ACS y si tales galaxias estuviesen a diferentes corrimiento hacia el rojo (de z~0,1 hasta z~1,1). Al estudiar las imágenes originales y las simuladas, no encontraron diferencias significativas al calcular sus magnitudes absolutas, sus radios de media luminosidad y los índices de Sérsic (ver su figura 9).

Por otro lado, al considerar las longitudes de onda de cada banda utilizada en las observaciones, es fácil percatarse que, asumiendo un valor medio de z=0,65 para las galaxias distantes, existe una buena concordancia entre las bandas, consideradas al

reposo, utilizadas para observar las galaxias distantes y las bandas utilizadas para observar las galaxias locales. Por tal motivo, el efecto de la corrección k es compensado. En todo caso, si consideramos las condiciones de observación del SDSS y las del HST/ACS correspondientes, podemos verificar si el estudio de las galaxias distantes se está realizando con datos tan profundos como, o más profundos que, los usados para las galaxias locales. Tal análisis nos lleva a la siguiente ecuación:

$$\frac{SNR^{HST}}{SNR^{SDSS}} = \sqrt{\frac{FWHM^{HST}}{FWHM^{SDSS}}} * \sqrt{\frac{T^{HST}}{T^{SDSS}}} * \frac{D^{HST}}{D^{SDSS}} * \sqrt{\frac{B^{SDSS}}{B^{HST}}} * \frac{f_{\lambda}^{HST_{z=0.0}}}{f_{\lambda}^{SDSS}} * \frac{1}{(1+z)^5} **$$

donde el último término toma en cuenta el “cosmological dimming” y la corrección k. Así, encontramos que el HST/ACS es más profundo que el SDSS por 0,52 – 0,08 – 1,02 mag, en un sistema de referencia en reposo, con respecto a las bandas u – g – r, respectivamente. Por lo tanto, se confirma la conclusión de Barden et al. [16] en cuanto a que no debe haber ningún efecto sistemático al analizar los parámetros morfológicos y fotométricos de una muestra a la otra.

II.) Análisis del perfil de luminosidad. Del análisis del perfil del brillo superficial de las galaxias se han derivado dos parámetros: el radio de media luminosidad (Rh) y la proporción de luminosidad del bulbo con respecto a la luminosidad total (B/T). Para medir el Rh nosotros hemos desarrollado nuestro propio código IDL, el cual nos permite analizar diferentes perfiles al mismo tiempo: (1) el perfil de flujo, (2) el perfil de magnitud, y (3) el flujo contenido en elipses con una diferencia de radio de 1 píxel. Las dos primeras nos permiten determinar un valor razonable para el cielo de fondo, y el último nos da el valor del Rh cuando un verdadero “plateau” es encontrado.

Luego, cada galaxia es descompuesta en la combinación de un bulbo y un disco utilizando un modelo 2D. Éste último se basa en la distribución de luminosidad (flujo) en las imágenes de las galaxias [17]. El perfil de luminosidad de cada galaxia es, de esta manera, modelado por la combinación de dos funciones de Sérsic. Una representa el bulbo con un índice de Sérsic no limitado, y la otra simula el disco con un índice de Sérsic igual a 1. La proporción B/T es determinada a partir de esta descomposición, así como también el radio, la magnitud, la inclinación y el ángulo de posición (PA) tanto del bulbo como del disco. La simulación GALFIT y la medida de Rh son realizadas utilizando las imágenes en banda r para las galaxias locales (que corresponde a nuestro sistema de referencia en reposo), y, por ende, las imágenes en banda z para las galaxias distantes.

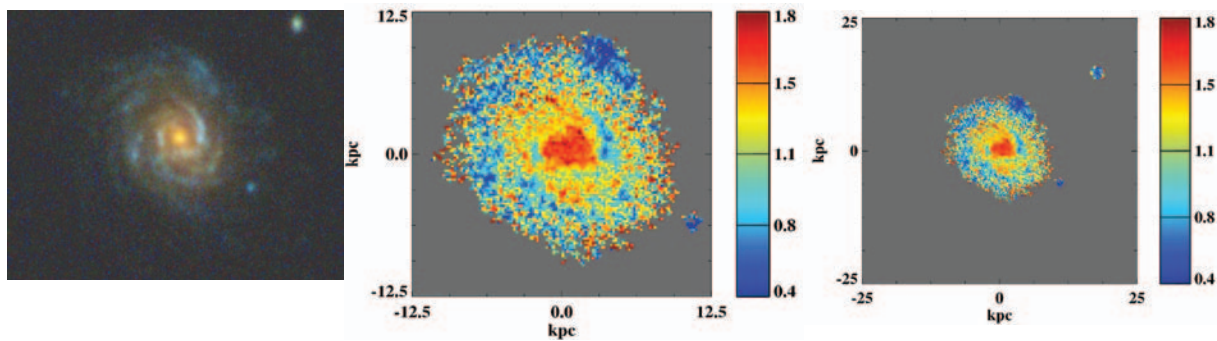
III.) Imágenes y mapas de color. El color es una información muy importante en nuestra clasificación morfológica. De esta forma, se debe utilizar los mismos colores, en un sistema de referencia en reposo, para ambas muestras (local y distante) al momento de construir los mapas e imágenes a color (ver Figura 1). Por lo tanto, en el caso de los mapas de dos colores, hemos utilizado las bandas u-r para la muestra local, y las bandas v-z para la muestra distante. Algo similar se hizo para las imágenes a tres colores (bandas u-g-r y v-i-z, respectivamente). Las imágenes a tres colores son útiles para el estudio de las estructuras a pequeña escala de las galaxias, mientras que los mapas a dos colores son necesarios para medir el

2 Estos subgrupos han sido arbitrariamente definidos por el “equivalent width” (EW) de la línea [OII]λ3727. El EW puede ser traducido al español como “ancho equivalente”. De esta manera, las galaxias activas poseen un EW([OII]λ3727) mayor de 15 Å, y las inactivas, menor de 15 Å. Para más detalles ver [9].

color de los rasgos individuales. Para construir estos últimos se sustrae, píxel a píxel, la magnitud en dos bandas usando un algoritmo que nos permite estimar el color y sus incertidumbres (ver detalles en [18]). El mapa a color de cualquier sub-estructura en la galaxia puede ser, de esta forma, comparado a los modelos de composición de población estelar. Así, se puede, por ejemplo, estimar el color de una barra o identificar regiones de gas o de formación estelar.

Clasificación Morfológica

Para hacer de nuestra clasificación morfológica un proceso



reproducibile y reducir su subjetividad, se ha construido un árbol de decisión semi-automático (ver Figura 2). El mismo fue adoptado de [4] y adaptado para incluir las galaxias S0 y E. De esta manera, la clasificación morfológica toma en cuenta todos los parámetros disponibles tales como el B/T, el Rh, los parámetros GALFIT, imágenes del modelo GALFIT e imágenes residuales, imágenes de error, el perfil disco-bulbo-galaxia, mapas a dos colores, e imágenes a tres colores. Para reducir la subjetividad residual, la clasificación morfológica de cada galaxia la realizamos tres astrónomos individualmente siguiendo el árbol de decisión. Dada la simplicidad relativa que aporta el árbol de decisión, la concordancia en la clasificación fue excelente tanto para las galaxias locales como las distantes. En el presente árbol de decisión también se han tomado en cuenta algunos otros aspectos como es el caso de la concordancia de los centros del bulbo y el disco de las galaxias. Además, dado el hecho que para nuestro estudio contamos con imágenes que poseen una resolución espacial mucho mejor ($0,108''$ FWHM) que en estudios anteriores, hemos utilizado un límite de 1 kpc en Rh, en lugar de 3 kpc, para clasificar las galaxias como compactas.

En resumen, podemos distinguir 4 tipos principales de galaxias:

- 1.) Elípticas (E): poseen un B/T entre 0,8 y 1,0, así como un bulbo más rojo que el disco;
- 2.) Lenticulares (S0): no existe la presencia de estructuras regulares (brazos), y el bulbo es más rojo que el disco. Se observa un disco muy simétrico, así como también la concordancia entre los centros del bulbo y del disco. El B/T tiene un valor entre 0,5 y 0,8;
- 3.) Espirales (Sp): Se caracterizan por un bulbo más rojo que el disco, brazos espirales regulares y un disco muy simétrico. Los centros del bulbo y del disco coinciden, y el B/T es menor de 0,5;

- 4.) Peculiares (Pec): su principal característica es la presencia de rasgo antisimétricos. Pueden ser divididas en 4 subclases: posibles fusiones (Pec/M), los cuales son objetos irregulares que pueden ser asociados a eventos de fusión o interacción; tipo renacuajo (Pec/T), los cuales son objetos que muestran un nódulo en un extremo con una cola extendida; irregulares (Pec/Irr), que son objetos ya sea con irregularidades antisimétricas que no pueden ser asociadas a brazos espirales, ya sea con un bulbo más azul que el resto de la estructura, u objetos con un desacuerdo entre los centros del bulbo y del disco mayor a 3 píxeles; compactas (Pec/C), las cuales son galaxias con un Rh menor de 1 kpc.

Resultados y Conclusiones

Finalmente, después de clasificar todas las galaxias de nuestras dos muestras, utilizando las mismas informaciones y el mismo método, llegamos a nuestros resultados.

Galaxias Locales. Se confirma que el Universo local esta dominado por las galaxias espirales, las cuales representan el 72% de la población, mientras que la fracción de E/S0 es de 18%. Las galaxias peculiares representan sólo el 10% de la población. Esto confirma también la fracción de espirales en las galaxias locales encontrada por Hammer et al. [19] utilizando como base la función de luminosidad morfológica de Nakamura et al. [20]. El número de galaxias compactas locales es muy pequeño (representando 2% de la población). Esto último prueba que nuestra clasificación no es alterada significativamente por la resolución espacial de las imágenes. Entre las 116 galaxias de la muestra local encontramos 96 (83%) galaxias inactivas ($EW([OII]\lambda 3727) < 15 \text{ \AA}$) y 20 (17%) galaxias activas ($EW([OII]\lambda 3727) > 15 \text{ \AA}$). Hammer et al. [8], utilizando un método completamente diferente, encuentra el mismo porcentaje de galaxias activas, las cuales tienen la misma definición que en el presente artículo (ver su figura 3 y su sección 3.1).

Galaxias Distantes. La combinación de las dos sub-muestras distantes en una sola muestra representativa se realizó siguiendo Hammer et al. [8]: las galaxias con un $EW([OII]\lambda 3727) < 15 \text{ \AA}$ representan el 40% de las galaxias a $0,4 < z < 1,0$, mientras que las galaxias con un $EW([OII]\lambda 3727) > 15 \text{ \AA}$ representan el 60%. De esta forma, encontramos que el Universo distante está dominado por las galaxias peculiares en un 52%, mientras que sólo 31% de ellas son espirales.

El resto de las galaxias (17%) son E/S0. Otro sorprendente resulta-

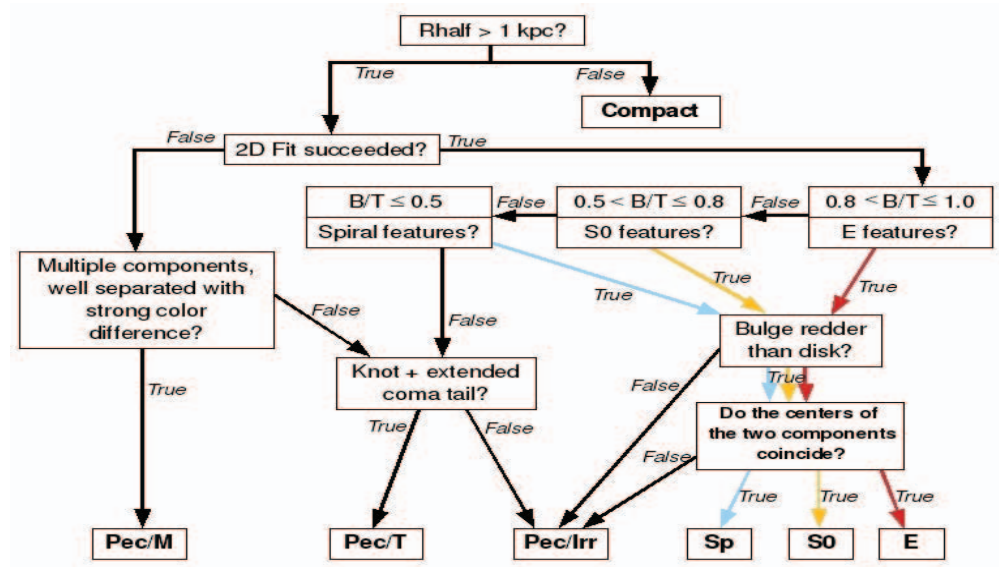
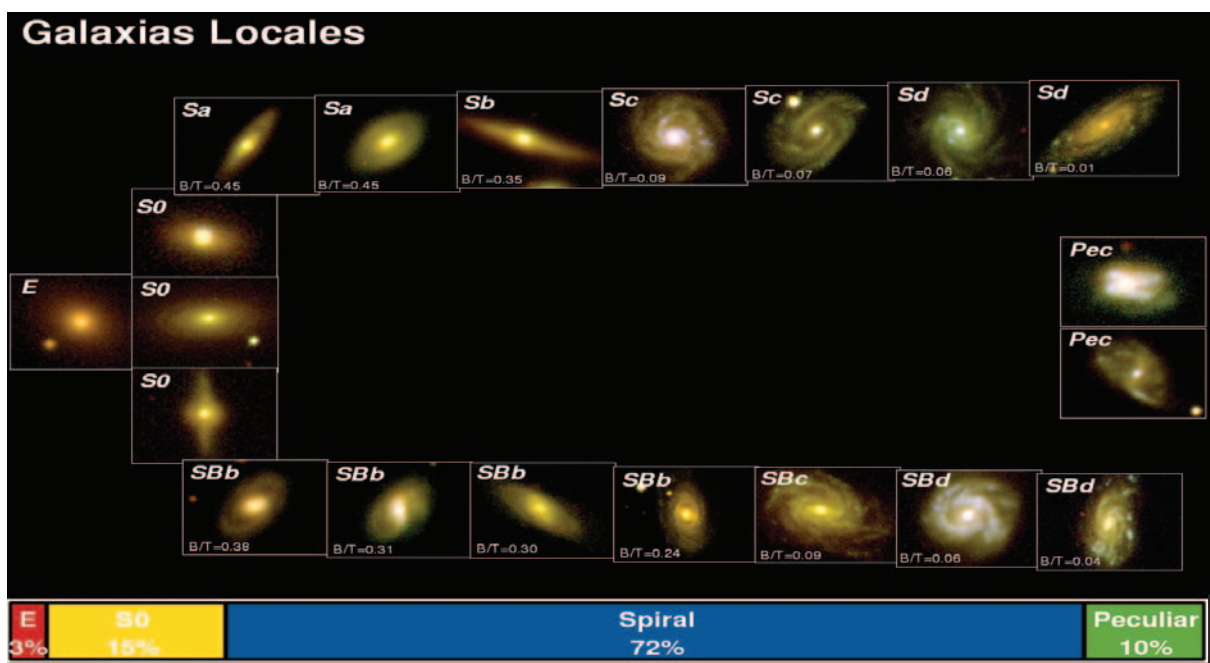
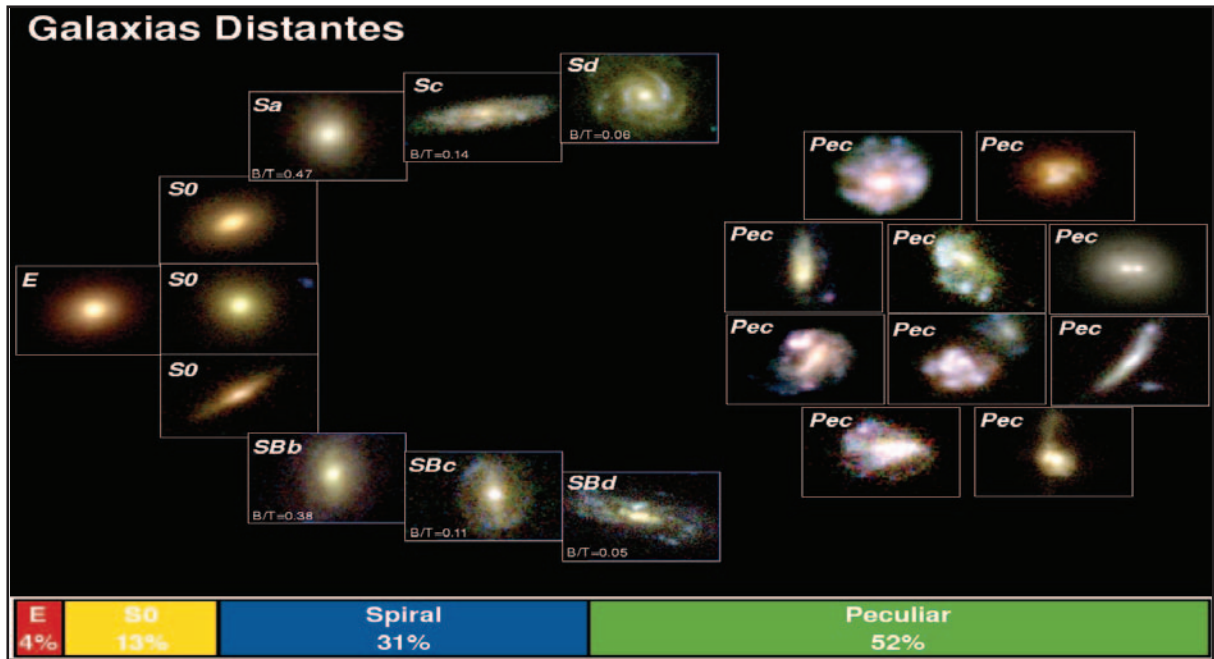


Figura 1. Izquierda: Ejemplo de una imagen a tres colores, Centro: Ejemplo de un mapa a dos colores de 25 kpc x 25 kpc. Derecha: Ejemplo de un mapa a dos colores de 50 kpc x 50 kpc





do es también el porcentaje (25%) de galaxias peculiares en la sub-muestra de galaxias inactivas, dado que todos los estudios precedentes predecían una fracción mucho más pequeña.

Estos resultados nos han permitido, por lo tanto, confeccionar la secuencia de Hubble tal como era hace 6 Giga-años, así como también la secuencia de Hubble local (ver Figura 3). De esta forma, hemos establecido una primera aproximación de lo que han podido ser los progenitores, hace 6 Giga-años, de las galaxias de la actual secuencia de Hubble, con una incertidumbre dominada por los errores estadísticos (estadística de Poisson). Entre las conclusiones más relevantes que podemos inferir a partir de nuestros resultados están: (1) la población de galaxias E/S0 no muestra evidencia de una evolución numérica durante los últimos 6 Giga-años, (2) más

Referencias

[1] Delgado-Serrano, R. 2010, El Tecnológico

[2] Delgado-Serrano, R., Hammer, F., Yang, Y. B., et al. 2010, A&A, 509, A260000

[3] van den Bergh, S. 2002, PASP, 114, 797

[4] Neichel, B., Hammer, F., Puech, M., et al. 2008, A&A, 484, 159

[5] Fukugita, M., Nakamura, O., Okamura, S., et al. 2007, AJ, 134, 579

[6] York, D. G., Adelman, J., Anderson, J. E., Jr., et al. 2000, AJ, 120, 1579

[7] Abazajian, K., Adelman-McCarthy, J. K., Agüeros, Marcel, A., et al. 2005, AJ, 129, 1755

[8] Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., et al. 2006, AJ, 131, 1163

[9] Hammer, F., Flores, H., Lilly, S. J., et al. 1997, ApJ, 481, 49

[10] Cirasuolo, M., McLure, R. J., Dunlop, J. S., et al. 2007, MNRAS, 380, 585

de la mitad de las galaxias distantes presentan morfologías peculiares, lo cual está asociado a una dinámica compleja según Neichel et al. [4]; (3) la fracción de espirales era 2.3 veces más pequeña hace 6 Giga-años que en el presente; (4) prácticamente toda la evolución de las galaxias Hamner, et al. 2005, ApJ, 627, 1709

presencia de la transformación de las galaxias espirales, en el pasado, en las galaxias espirales actuales.

[13] Para mayor detalle, con respecto a los posibles efectos que puedan afectar la conexión entre las dos secuencias de Hubble ver el nuevo artículo de Delgado-Serrano et al. 2012. Tales efectos de observación y de selección están relacionados principalmente con el índice de fusión galáctica y la evolución de la población de estrellas jóvenes anexas.

[16] Barden, M., Jahnke, K., & Häußler, B. 2008, ApJS, 175, 105

[17] Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., & Rix, H. W. 2009, arXiv:0912.0731

[18] Zheng, X. Z., Hammer, F., Flores, H., Assémat, F., & Rawat, A. 2005, A&A, 435, 507

[19] Hammer, F., Flores, H., Elbaz, D., et al. 2005, A&A, 430, 115

[20] Nakamura, O., Fukugita, M., Brinkmann, J., & Schneider, D. P. 2004, AJ, 127, 2511

Ave. Ricardo J. Alfaro. Edif. Sun Towers Mall, Piso 3
 Tel.: (+507) 501-3800 • Fax: (+507) 501-3506
 www.etesa.com.pa