

# Práctico 4: Segregación Morfológica en Cúmulos Ricos

Agustina del Valle Colazo

03 de Noviembre, 2023

## Abstract

En este trabajo se calculó, para una muestra de 5725 galaxias pertenecientes a 56 cúmulos ricos cercanos, la fracción de galaxias de distintos tipos morfológicos en función de la densidad local proyectada. Se verificó que las galaxias tardías representan la mayor parte de la población galáctica en ambientes con densidades locales bajas, i.e del orden de  $\sim 1 \text{ gal}/\text{Mpc}^2$ . Por otro lado, en los entornos con densidades altas, i.e del orden de  $\sim 300 \text{ gal}/\text{Mpc}^2$ , predominan las poblaciones elípticas y lenticulares. Además, para todo el rango de densidades considerado se observó una mayor proporción de galaxias lenticulares que elípticas. Estos resultados concuerdan con lo obtenido por otros autores.

## 1 Introducción

### 1.1 Cúmulos de Galaxias

A pequeñas escalas, las galaxias no están distribuidas uniformemente, sino que tienden a agruparse en estructuras tales como los grupos y cúmulos de galaxias. Los cúmulos de galaxias son las estructuras cósmicas virializadas más masivas del Universo. Estos sistemas suelen tener más de 50 galaxias brillantes contenidas en una distribución más o menos esferoidal con un diámetro entre  $\sim 1 - 2 \text{ Mpc}$  (Mo & White 2010), sus masas son del orden de  $M_{\text{vir}} \sim 10^{14} M_{\odot}$  y tienen velocidades de dispersión  $\sigma_v \sim 500 - 1000 \text{ Km/s}$ . Es decir que los cúmulos marcan los picos de densidad más importantes de

la estructura a gran escala en el Universo, por lo tanto es necesario investigar como estos ambientes extremos de alta densidad afectan la formación y evolución de las distintas poblaciones de galaxias (Schneider 2015).

Si bien en el rango óptico del espectro la apariencia de un cúmulo queda determinada por la población de galaxias que contiene y su distribución, estas solo contribuyen una pequeña fracción de la masa total de un cúmulo. En realidad, estos sistemas tienen 3 componentes principales, un halo de materia oscura, una componente gaseosa que forma el medio intracúmulo, y por último la componente luminosa formada por las galaxias que son miembros del cúmulo (Schneider 2015).

El halo de materia oscura es la componente más masiva del cúmulo, está compuesto por materia no bariónica que no emite ningún tipo de radiación y sólo interactúa con el material bariónico a través de la gravitación. Por lo tanto, sólo puede ser detectado indirectamente, por ejemplo a partir de estudiar la dinámica de las galaxias. Ya en 1933 se comenzó a evidenciar su existencia (Zwicky 1933), pues se detectó una discrepancia importante entre la masa del cúmulo calculada a partir de su potencial gravitatorio, y la masa luminosa observada. Si se estima la masa de los cúmulos a partir del teorema del Virial y las velocidades de dispersión se obtiene un valor muy grande en comparación con el calculado a partir del material bariónico que puede ser observado (Rood 1974). A partir de este y otros métodos más precisos, se llegó a la conclusión de que los cúmulos están embebidos en un halo de materia oscura muy masivo y extenso.

La segunda componente más importante en los cúmulos de galaxias es el medio intracúmulo (ICM), se trata de un gas caliente con temperaturas del orden de  $\sim 10^7 K$  que permea todo el espacio entre las galaxias. El ICM es una importante fuente de radiación en rayos-X, gracias a esto se lo pudo estudiar y se estima que contiene más bariones que toda la componente estelar de las galaxias que forman parte del cúmulo (Schneider 2015).

La tercer característica principal de los cúmulos es que están compuestos por un importante número de galaxias masivas. Históricamente, dado que sólo se observaba en el rango óptico del espectro la única manera de detectar cúmulos era identificando sobredensidades de galaxias con respecto a la densidad promedio del campo (Panko 2017). Por lo tanto, si bien esta componente contribuye con menos del 5% al total de la masa de los cúmulos, es la mejor estudiada y conocida, ayuda a detectar fácilmente estos sistemas y permite investigar cómo este tipo de entornos influye en las interacciones entre galaxias y cuál es su efecto en la formación y evolución de las mismas.

Por último, es importante destacar que los cúmulos de galaxias se han clasificado de diversas formas, siendo una de ellas la clasificación de (Abell 1958), en donde se separa a los cúmulos en regulares e irregulares. Los cúmulos regulares son más compactos y simétricos, tienen un mayor número de galaxias, es decir que son cúmulos ricos. Además, su región central es muy densa y suelen estar completamente dominados por galaxias tempranas. Mientras que los irregulares son menos compactos, su densidad central es mucho menor que la de los cúmulos regulares y tienen un menor número de miembros. Por otro lado, suelen tener subestructuras significativas y una mayor fracción de galaxias tardías. En resumen, se puede decir que los cúmulos regulares se encuentran en un estado virializado en equilibrio, mientras que los cúmulos irregulares todavía están en proceso de evolución.

## 1.2 Segregación Morfológica

Los primeros estudios realizados en cúmulos revelaron que sus poblaciones de galaxias tienen marcadas diferencias respecto a las poblaciones de campo, indicando que la evolución de estas es fuertemente influenciada por el entorno. En particular, se descubrió que los ambientes más densos albergan un mayor porcentaje de galaxias tempranas, mientras que en los menos densos, predominan las galaxias de tipo tardío (Oemler 1977).

Esta relación entre morfología y densidad, también llamada segregación morfológica, fue mejor cuantificada por (Dressler 1980b), quien estudió la fracción de galaxias de cada tipo morfológico en función de la densidad local proyectada en 55 cúmulos ricos. Nuevamente se confirmó que la fracción de galaxias tardías es mayor en las regiones de menor densidad y va disminuyendo a medida que se consideran regiones de mayor densidad en el cúmulo, mientras que la fracción de galaxias tempranas muestra básicamente el comportamiento opuesto. Además, se pudo verificar que el número de galaxias S0 es significativamente mayor en los cúmulos que en el campo. (Dressler 1980b) concluyó a partir de su estudio que las poblaciones de galaxias son determinadas por las condiciones locales más que por las globales.

Por otro lado, (Whitmore et al. 1993) estudió la segregación morfológica en función de la distancia al centro del cúmulo normalizada, en vez de utilizar la densidad local proyectada como variable independiente. Análogamente se encontró que las elípticas se concentran en la región central de los cúmulos, independientemente de si son difusos, tienen velocidades de dispersión bajas o poca emisión en rayos X, mientras que las espirales se encuentran más fre-

cuentemente en las periferias. En su estudio, (Whitmore et al. 1993) propuso que las protogalaxias que luego se convertirían en espirales eran destruidas durante el proceso de colapso de los cúmulos, y su gas pasaba a formar parte del medio intracúmulo. De esta forma, concluyó que los mecanismos globales son los responsables de causar la segregación morfológica en los cúmulos.

En los cúmulos existen múltiples procesos físicos que podrían transformar las galaxias tardías y formadoras de estrellas en galaxias tempranas y pasivas. Como los cúmulos son entornos con altas densidades de galaxias, si bien las velocidades de dispersión en general son muy altas para que se produzcan 'mergers' de galaxias, eso no quita que estas puedan sufrir frecuentes interacciones. Las galaxias pueden ser afectadas por efectos tidales a partir de interacciones con otras galaxias, con el potencial del cúmulo e incluso con el ICM (Mo & White 2010).

Durante los encuentros de alta velocidad entre galaxias, estas se calientan de forma repentina, disminuyendo sus reservas de gas frío y por lo tanto su tasa de formación estelar. Además, como resultado, las galaxias perturbadas se vuelven menos ligadas y más vulnerables a las interacciones posteriores y a las interacciones tidales con el potencial global del cúmulo. El efecto acumulativo de múltiples encuentros a alta velocidad se conoce generalmente como 'galaxy harassment'. Este proceso puede impactar en las galaxias tardías con discos de baja densidad superficial, haciendo que pierdan parte de su población estelar y que las estrellas que permanecen ligadas tengan un movimiento más caótico, transformando el disco en una componente más esferoidal (Mo & White 2010).

Por otra parte, cuando una galaxia atraviesa el ICM este le ejerce una presión sobre su componente gaseosa, un efecto conocido como 'ram pressure'. Si esta presión supera la fuerza por unidad de área que mantiene al gas de la galaxia ligado al disco, puede llegar a arrancarle una fracción importante de su componente gaseosa. De esta forma, una espiral pierde la mayor parte de su medio interestelar y su tasa de formación estelar se reduce considerablemente. Por lo tanto, este mecanismo ayudaría también a explicar la razón por la cual en los entornos más densos se observa una escasez de galaxias tardías, ricas en gas y formadoras de estrellas, y en cambio hay una mayor fracción de galaxias S0 que en el campo (Mo & White 2010).

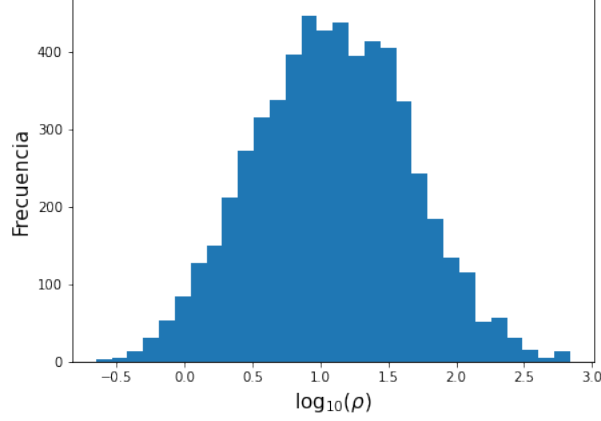


Figure 1: Distribución del logaritmo de la densidad local proyectada  $\rho$  [ $\frac{galaxias}{Mpc^2}$ ], para la muestra total de galaxias.

## 2 Procedimiento

Con el objetivo de reproducir los resultados obtenidos por (Dressler 1980b), en este trabajo se utilizó una muestra de 56 cúmulos ricos de galaxias de bajo redshift, los cuales fueron identificados utilizando el método descrito por (Dressler 1980a), obteniendo un total de 5725 galaxias. En primer lugar, se calculó la densidad local proyectada para cada galaxia de la muestra a través de la ec.(1), donde  $d_{10}$  es la distancia proyectada a la décima galaxia más próxima.

$$\rho = \frac{10}{\pi d_{10}^2} \left[ \frac{galaxias}{Mpc^2} \right] \quad (1)$$

Esto se realizó de la siguiente manera, para un dado cúmulo, se fijaba una determinada galaxia y se calculaba la distancia entre esta y cada una de las demás galaxias miembro mediante la ec.(2), donde  $H_0 = \frac{70km}{s Mpc}$  y  $z$  es el redshift del centro del cúmulo, mientras que  $\theta$  es la distancia angular proyectada entre las galaxias.

$$d = \frac{cz}{H_0} \tan(\theta) \quad (2)$$

Luego, se obtenía aquella galaxia que fuera la décima más cercana y usando esa distancia  $d_{10}$ , se calculaba la densidad local proyectada para la

galaxia de interés. Este procedimiento luego se repetía para cada galaxia del cúmulo, y a su vez para cada uno de los cúmulos de la muestra.

En la distribución del logaritmo de la densidad local proyectada, ver Fig.1, se observa que la mayoría de las galaxias se encuentran en un ambiente con una densidad local proyectada promedio del orden de  $10 \frac{\text{galaxias}}{\text{Mpc}^2}$  lo cual concuerda con lo obtenido por (Dressler 1980b).

### 3 Resultados

La muestra de 5725 galaxias pertenecientes a 56 cúmulos fue dividida en 10 bins de densidad local proyectada, y se calculó para cada bin la fracción de galaxias que eran espirales o irregulares, lenticulares y elípticas. En la Fig.2 se muestra la fracción de galaxias de cada tipo morfológico en función de la densidad local proyectada. En primer lugar, se observa que la fracción de galaxias tardías disminuye de un 60%, para densidades del orden de  $\sim 1 \text{ gal/Mpc}^2$ , hasta un 10% para densidades altas, del orden de  $10^{2.5} \sim 300 \text{ gal/Mpc}^2$ . Mientras que las tempranas muestran un comportamiento opuesto, la fracción de galaxias elípticas aumenta de un 10% para densidades del orden de  $\sim 1 \text{ gal/Mpc}^2$  hasta un 40% para densidades altas, del orden de  $10^{2.5} \sim 300 \text{ gal/Mpc}^2$ . Este gradiente es más notable a partir de densidades mayores a  $\sim 10^{1.5} \text{ gal/Mpc}^2$ . Por otro lado, si bien las S0 no poseen un gradiente tan marcado se observa que aumenta en un 20% la fracción de lenticulares en las regiones de alta densidad respecto a las de baja densidad. Además, para todo el rango de densidades se destaca que hay una mayor proporción de galaxias lenticulares que elípticas. Comparando estos resultados con los obtenidos por (Dressler 1980b) se observa un gran acuerdo entre ambos.

A su vez, la fracción de galaxias lenticulares supera la fracción de galaxias tardías a partir de una densidad de  $10^{1.3} \sim 20 \text{ gal/Mpc}^2$  y en el paper de (Dressler 1980b) se observa dicho cruce para un valor muy similar, i.e  $\sim 10 \text{ gal/Mpc}^2$ . Mientras que la fracción de galaxias elípticas supera la fracción de galaxias tardías a partir de una densidad de  $10^{1.8} \text{ gal/Mpc}^2$  y en el paper de (Dressler 1980b) se observa dicho cruce para un valor de  $\sim 10^{1.6} \text{ gal/Mpc}^2$ .

Por otro lado, en el estudio realizado por (Whitmore et al. 1993) de la morfología en función de la distancia normalizada al centro del cúmulo, se obtuvieron las mismas tendencias generales pero con ciertas diferencias. Por ejemplo, (Whitmore et al. 1993) obtuvo una fracción de galaxias elípticas

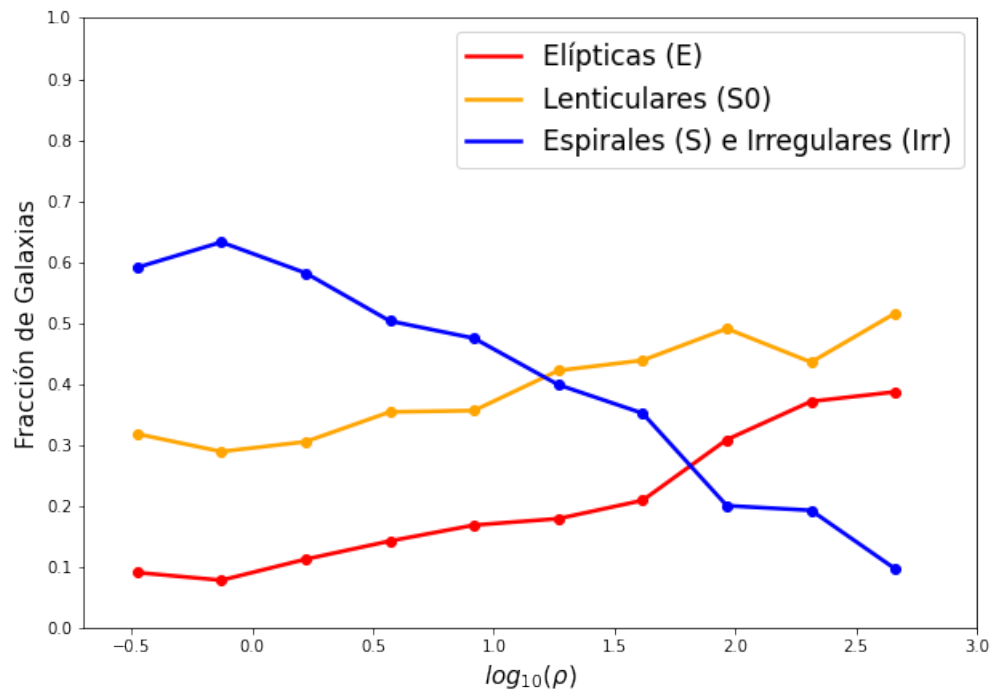


Figure 2: Gráfico de la fracción de galaxias elípticas (rojo), lenticulares (amarillo) y espirales (azul), en función del logaritmo de la densidad local proyectada  $\log_{10}(\rho)$ .

igual a  $59\% \pm 6\%$  para galaxias dentro de un radio de  $0.12 \text{ Mpc}$  respecto al centro del cúmulo. Este es un porcentaje mayor al obtenido en este trabajo, i.e  $40\%$  para las densidades más altas. Además, el gradiente obtenido por (Whitmore et al. 1993) es menor, de hecho recién se observa un aumento pronunciado en la fracción de elípticas a distancias muy cercanas al centro, i.e dentro de un radio de  $\sim 0.5 \text{ Mpc}$ , mientras que a distancias mayores el gradiente es más modesto. Por otra parte, la fracción de espirales decae fuertemente dentro de un radio de  $1 \text{ Mpc}$  hasta ser prácticamente cero en el centro del cúmulo.

No obstante, es importante destacar que lo ideal es tener en cuenta tanto las propiedades locales como las globales porque ambos efectos ayudan a explicar la segregación morfológica de los cúmulos. Los mecanismos globales dominan en las regiones de alta densidad, i.e las zonas virializadas de los cúmulos, por lo tanto en esos casos conviene estudiar el tipo morfológico en función de parámetros más globales como la distancia al centro del cúmulo o la densidad de masa global del cúmulo en la posición de las galaxias. Por el contrario, la densidad local proyectada de las galaxias es el parámetro relevante en las zonas periféricas de baja densidad, donde la influencia del cúmulo en su conjunto es relativamente pequeña en comparación con los efectos locales (Domínguez et al. 2001).

## 4 Conclusiones

En este trabajo se calculó para una muestra de 5725 galaxias pertenecientes a 56 cúmulos ricos, la fracción de galaxias elípticas, lenticulares y espirales o irregulares, en función de la densidad local proyectada  $\log_{10}(\rho)$ . Los resultados obtenidos reflejan que la fracción de galaxias tardías representan un  $60\%$  de la población total, para ambientes con densidades del orden de  $\sim 1 \text{ gal/Mpc}^2$ , pero este porcentaje disminuye a un  $10\%$  en aquellos entornos con una densidad local proyectada del orden de  $\sim 300 \text{ gal/Mpc}^2$ .

Las galaxias tempranas muestran un comportamiento opuesto, el porcentaje de galaxias elípticas aumenta desde un  $10\%$  para densidades del orden de  $\sim 1 \text{ gal/Mpc}^2$  hasta un  $40\%$  para entornos con densidades del orden de  $\sim 300 \text{ gal/Mpc}^2$ . Este gradiente es más notable para densidades mayores a  $\sim 30 \text{ gal/Mpc}^2$ . Por otro lado, si bien las S0 no poseen un gradiente tan marcado se observa que aumenta un  $20\%$  la fracción de lenticulares en las regiones de alta densidad respecto a las de baja densidad. Además, para



todo el rango de densidades se observa una mayor proporción de galaxias lenticulares que elípticas.

En conclusión, se verificaron los resultados obtenidos en la literatura respecto a la segregación morfológica en los cúmulos de galaxias. No obstante, para realizar un análisis más preciso lo ideal sería estudiar el tipo morfológico en función de la densidad local proyectada en las zonas periféricas de baja densidad, y para la zona central del cúmulo, que es un entorno mucho más denso, sería mejor utilizar un parámetro más global como la distancia normalizada al centro del cúmulo o la densidad de masa del cúmulo en la posición de las galaxias.

## References

- Abell, G. O. 1958, *ApJS*, 3, 211
- Domínguez, M., Muriel, H., & Lambas, D. G. 2001, *AJ*, 121, 1266
- Dressler, A. 1980a, *ApJS*, 42, 565
- Dressler, A. 1980b, *ApJ*, 236, 351
- Mo, H. van den Bosch, F. & White, S. 2010, *Galaxy Formation and Evolution* (Cambridge University Press)
- Oemler, Augustus, J. 1977, *Highlights of Astronomy*, 4, 253
- Panko, E. 2017, in *Introduction to Cosmology, Proceedings of the Polish Astronomical Society*, ed. M. Biernacka, K. Bajan, G. Stachowski, & A. Pollo, Vol. 4, 132–140
- Rood, H. J. 1974, *ApJ*, 194, 27
- Schneider, P. 2015, *Extragalactic Astronomy and Cosmology* (Springer Berlin, Heidelberg)
- Whitmore, B. C., Gilmore, D. M., & Jones, C. 1993, *ApJ*, 407, 489
- Zwicky, F. 1933, *Helvetica Physica Acta*, 6, 110