

Galaxias y cúmulos de galaxias

Introducción

Si bien la fracción de galaxias que pertenecen a algún cúmulo o grupo numeroso de galaxias es pequeña, apenas de un 5%, los cúmulos de galaxias son sumamente conspicuos y fácilmente detectables sobre el resto de las galaxias que componen el Universo. Estos cúmulos son brillantes y tienen en su mayoría galaxias también muy brillantes que hacen posible su identificación aun a grandes distancias, comparables, en magnitud, a los confines del Universo. Es así que resultan ser una herramienta fundamental en el estudio de la cosmología, útiles para determinar la escala de distancias astronómicas mediante el estudio de algunas de sus propiedades intrínsecas como son su luminosidad (brillo) o sus dimensiones físicas.

En los principios de la década de los setenta, las investigaciones astronómicas sobre cúmulos de galaxias se potenciaron ante la evidencia de la "evolución de galaxias", entendida ésta como la transformación de un conjunto muy grande de estrellas que compartían una misma historia genética, con diferencias tanto en sus dimensiones (radio, cantidad de materia, etc.) como su composición química y, lo que es más interesante, en su historia ambiental. Por mencionar un ejemplo, se reconoció en esos años la existencia de ciertos objetos: "supergalaxias" que no se parecían a ninguna de las galaxias que se encontraban en el "campo general", es decir objetos que no pertenecen a grupo o cúmulo alguno.

A este respecto, se preguntaban los astrónomos extragalácticos (aquellos que estudian las galaxias externas a la Vía Láctea, nuestro propio sistema galáctico), ¿cómo había sido posible la evolución de estos objetos dentro del medio ambiente excepcional del cúmulo? Ahora sabemos que la población de galaxias en las regiones más populosas de los cúmulos de galaxias está sesgada hacia los tipos de galaxias que no tienen un disco o brazos espirales importantes, es decir las galaxias elípticas y SO. Esto significa que no encontraremos muchas galaxias espirales en las regiones donde existen muchas otras galaxias. Esta frecuencia de galaxias espirales no es la misma que se podría encontrar en las regiones del campo general de galaxias, caracterizadas típicamente por estar formando estrellas. ¿Cuál podría haber sido esta diferencia tan obvia, y qué podría estar diciéndonos sobre la formación y evolución de los varios tipos "morfológicos" de galaxias? Se descubrió también que muchos cúmulos ricos en galaxias contenían una fracción im-

portante de gas intercúmulo. ¿Podría haber ocurrido que interacciones entre galaxias y este gas fueron lo suficientemente intensas como para producir alteraciones en las propiedades de las galaxias en particular en el contenido de gas y en la formación de estrellas?

Recientemente se ha establecido que los cúmulos de galaxias son un estupendo laboratorio para estudiar la evolución de estos objetos lejanos que podrían ser tan útiles en el estudio de la evolución estelar, como lo han sido los cúmulos de estrellas en nuestra galaxia. En la actualidad es fundamental el estudio de la morfología, (distribución espacial de galaxias, dimensiones, brillos, etc.), estructura y la dinámica de los cúmulos de galaxias, para entender cómo se formaron las galaxias y cómo han cambiado o evolucionado como respuesta a la acción del medio ambiente que las rodea. En esta breve reseña, expondremos las evidencias a este respecto. Lo que se conoce sobre la naturaleza de la estructura a gran escala del Universo: la distribución de los cúmulos en el espacio, y la formación de cúmulos y supercúmulos de galaxias, nos permite conocer cómo fueron las estructuras primordiales durante las etapas más tempranas de formación del Universo.

El laboratorio

Como mencionamos, una fracción menor al 5% de las galaxias que se observan en el Universo presente, pertenece a algún grupo o cúmulo cuya densidad espacial es mayor que una galaxia en un volumen equivalente a 3 millones de años luz. Algunos de estos agregados de galaxias son muy populosos y densos. Estos son los cúmulos catalogados por Abell en 1960, quien utilizó el entonces recién compilado mapa celeste fotográfico del Observatorio de Palomar. Algunos de los más "ricos" cúmulos contienen típicamente 100 galaxias en un volumen de varios millones de años luz.

El cúmulo más cercano a nuestra galaxia es el de Virgo, el cual es un cúmulo relativamente normal: las galaxias que lo componen, tanto espirales como elípticas y SO (ver Figura 1), están igualmente representadas. La distribución de sus galaxias es asimétrica y muestra algunas concentraciones en ciertas regiones del cúmulo. Se diría que es un cúmulo promedio. Sin embargo, otro de los cúmulos más cercanos a nosotros es curiosamente uno de los cúmulos más raros y más ricos que existen. A éste se le conoce como el cúmulo de Coma, y tiene

una población en la cual predominan las galaxias elípticas y SO, con una deficiencia en galaxias espirales. Su distribución de galaxias es muy simétrica y concentrada hacia el centro. Sin embargo, estudios recientes de investigadores mexicanos han demostrado que Coma presenta un cierto grado de subacumulación (Recillas, Pimentel y Serrano), lo cual indicaría regiones en donde la densidad es mayor. Una característica singular de este cúmulo es la presencia de dos “supergalaxias” que dominan la región central del cúmulo.

La cercanía de Coma ha permitido realizar estudios muy detallados de las condiciones extremas en las cuales se han formado y han evolucionado las galaxias, condiciones éstas que son función del medio ambiente y cuyos resultados pue-

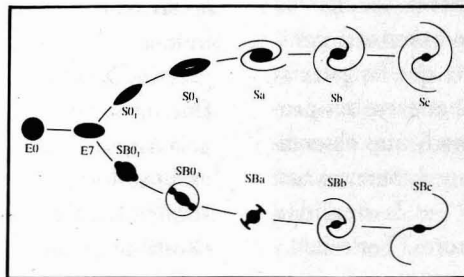
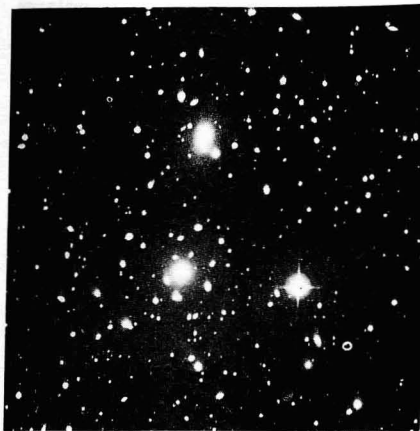
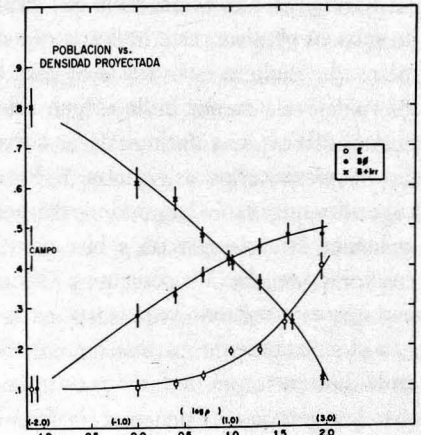


Figura 1. Región central del cúmulo de Coma. Este cúmulo tiene una gran cantidad de galaxias, predominando las galaxias “caníbales”. Figura 2. Clasificación de Hubble de las galaxias morfológicas: elípticas (E), espirales (S), barradas (SB) y SO. Figura 3. Relación morfología-densidad que muestra cómo las galaxias elípticas predominan en las regiones densas y las espirales en las tenues.



den ser extrapolados a otros cúmulos más lejanos y menos populosos.

Los estudios que se han hecho y que trataremos de describir, han permitido entender cómo las interacciones galaxia-galaxia y galaxia-cúmulo han influido en el desarrollo de los diferentes tipos morfológicos, la formación de estrellas en galaxias y la estructura y función de luminosidad de las galaxias miembros de cúmulos. La mayoría de estos procesos dependen de varios parámetros: la densidad local de galaxias y o del gas; la cinemática de la distribución de galaxias; los tipos, estructuras y cinemática interna de las galaxias presentes.

Evolución de los diferentes tipos de galaxias

Los cúmulos de galaxias tienen una variedad y una complejidad de sus componentes que permiten, en un momento dado, estudiar las “formas” en que se da la materia luminosa, que es descrita por el tipo morfológico de las respectivas galaxias que conforman el grupo. Para lograr este objetivo, es necesario estudiar las condiciones iniciales al momento de la formación de las galaxias, su densidad, momento angular o cantidad de momento y el contenido de gas que produce la diversidad de tipos morfológicos. Es importante también estudiar, como veremos más adelante, los efectos que alterarán estas condiciones iniciales y que modifican la cantidad de materia y la distribución espacial de galaxias en regiones de alta densidad ambiental.

A continuación se presenta una descripción básica de los atributos primarios de las galaxias y su distribución que toda hipótesis o teoría de formación y evolución de galaxias que se proponga debe explicar satisfactoriamente:

1. Existen diversos tipos morfológicos. Las primeras observaciones y descripciones de galaxias debidas a Morgan, Sandage, De Vaucouleurs y otros, reconocieron galaxias esferoidales así como galaxias llamadas de disco que además de presentar una distribución global muy plana de las estrellas, tienen una componente esferoidal. Existe una continuidad entre las diferentes especies o tipos de galaxias que se diferencian básicamente por la importancia relativa de su cociente de disco a bulbo (componente esferoidal), D/B. (Figura 2, diagrama de “diapasón” de

Erwin Hubble). Las galaxias elípticas y SO tienen discos casi despreciables o muy pequeños, mientras que en las galaxias espirales los discos aumentan en importancia, relativamente a la componente de bulbo. Cuando existe una componente gaseosa, ésta genera un patrón espiral muy luminoso asociado a los sitios de formación estelar. Por contraste, la formación estelar en los últimos miles de millones de años en los sistemas con muy poco material en forma de gas (galaxias SO y espirales tempranas) y las elípticas, es despreciable.

2. Tanto en un medio ambiente de baja densidad como en aquéllos muy densos, es posible detectar objetos de todo tipo morfológico. Astrónomos pioneros en el estudio de la clasificación de galaxias y cúmulos de galaxias, como Hubble y Humason en 1931 y Morgan y Abell en los años sesenta, describieron la transición a los tipos morfológicos tempranos (galaxias elípticas y SO) en cúmulos ricos en galaxias. Oemler a su vez, estableció en 1974 la relación entre densidad y tipo morfológico, identificando mezclas características de galaxias elípticas, SO y espirales. A principios de los años ochenta Dressler demostró cuantitativamente que una descripción global de esta naturaleza derivaba de una relación muy estrecha entre la morfología y la densidad local de galaxias, relación cuya validez se extiende varios órdenes de magnitud en densidad espacial. Esta relación nos dice que independientemente de las características globales del cúmulo, la fracción de galaxias espirales decrece a medida que la fracción de galaxias elípticas y SO aumenta con la densidad ambiental local (ver Figura 3. Relación morfología-densidad). Y si bien la fracción de ga-

laxias elípticas y SO es del 80 al 90% en las regiones más densas de los cúmulos y las espirales, a su vez, constituyen una fracción también del 80-90% en las regiones de baja densidad; todos los tipos morfológicos están representados.

3. Las galaxias elípticas parecieran ser los sistemas más elementales. En primera aproximación son una familia de objetos con un solo parámetro en luminosidad, es decir, sus propiedades globales sólo dependen de una característica física que sería la masa. Sus dimensiones, colores, (abundancias de metales pasados?), y velocidades internas características (velocidades de rotación y velocidades típicas de sus componentes estelares) se escalan monotónicamente con la luminosidad, *i.e.* la cantidad de materia en la galaxia. Sin embargo, observaciones recientes de galaxias elípticas de Binggeli, Sandage y colaboradores, han evidenciado que existe más de una familia de galaxias elípticas. Esto indicaría que debe haber otro parámetro que pudiera estar actuando para hacer que las galaxias esferoidales de menor brillo tengan relaciones entre sus propiedades físicas muy distintas de las correspondientes observadas en galaxias elípticas gigantes. E. Recillas y A. Serrano han sugerido que este "segundo parámetro" es la densidad ambiental local de galaxias, si bien otros autores (Terlevitch y colaboradores, De Vaucouleurs y Olson y otros más) proponen que este segundo parámetro sea la composición química y/o el achatamiento intrínseco como factores determinantes en la diferenciación de familias de galaxias elípticas.

4. Las galaxias SO tienen normalmente un cociente disco a bulbo, D/B, pequeño y un disco "grueso" comparativamente a las galaxias espirales. Esto sugeriría, como veremos más adelante, que es poco probable que las galaxias espirales hayan dado origen a galaxias sin brazos como son las SO, por un efecto de "empobrecimiento" de gas y estrellas debido a un proceso de marea al ocurrir encuentros y choques de galaxias dentro de los límites de los cúmulos.

5. Las galaxias espirales se clasifican por su cociente D/B y por la estructura detallada de su patrón espiral (*i.e.* grado de separación de los brazos, grosor y contraste luminoso entre los brazos y el resto de la galaxia). Sus formas no se correlacionan bien con la luminosidad de la galaxia, pero según S. Strom, el

contenido gaseoso y el patrón espiral parecen estar asociadas al cociente D/B.

6. Conjuntamente con estas características descritas, es importante hacer notar que la estructura dominante en todos estos sistemas puede ser un halo invisible muy masivo. Sin duda, las interacciones probables entre los halos masivos de galaxias en un cúmulo podrían, a su vez, tener repercusiones importantes en la materia luminosa que contienen.

Tres clases de modelos

Los modelos que se han sugerido para explicar las características que hemos descrito anteriormente, se ubican en tres grupos.

En la primera clase de modelos se considera a todas las galaxias como formadas bajo condiciones iniciales similares, independientemente de su destino ulterior ya sea como galaxias miembros de cúmulos o del campo general. Aquí las fluctuaciones primordiales que formarán posteriormente galaxias no "saben" cuál será su medio ambiente. Las galaxias están ya formadas con su peculiar morfología antes de que se formen las fluctuaciones de densidad más importantes que constituirán los cúmulos. De esta manera, las galaxias SO se formarían de galaxias espirales que han perdido su gas, *i.e.* sus discos espirales, por efectos de marea, y las galaxias elípticas se generarían por la acción de la fusión de galaxias inicialmente espirales.

En el segundo grupo de modelos, la evolución posterior es el factor determinante del tipo morfológico, en particular por el truncamiento del desarrollo de un disco. Sin embargo, también se invocan las condiciones iniciales o la evolución muy temprana para explicar el predominio de galaxias con bulbos importantes en las regiones más densas. Esto se podría lograr proponiendo que las galaxias con condensaciones centrales mayores sí "reconozcan" que deben preferencialmente habitar las regiones más densas de los nacientes cúmulos; o bien incluyendo galaxias en fusión para formar esferoides más masivos durante las etapas más tempranas de la evolución de los cúmulos.

En resumen, si estos modelos no permiten explicar los datos

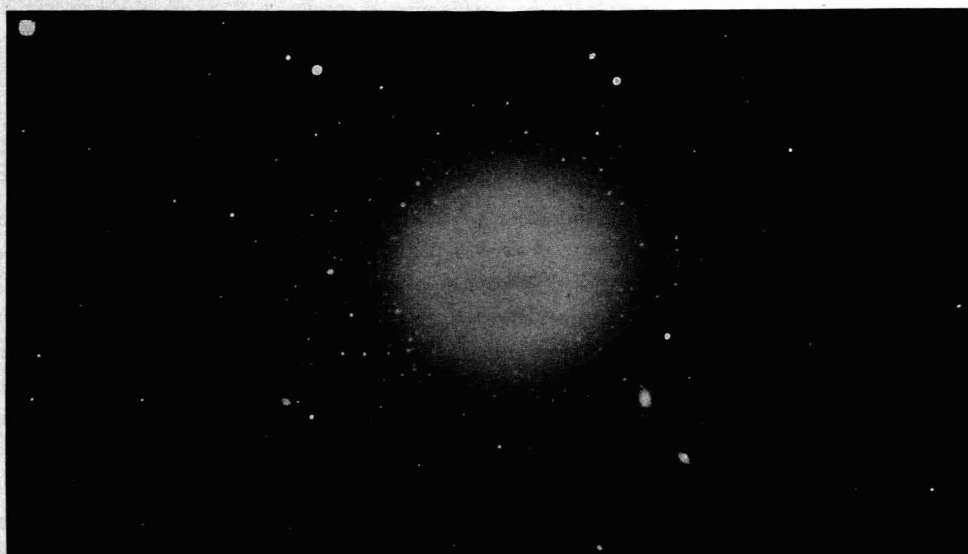


Figura 4. Galaxia gigante en el cúmulo de Virgo llamada M87.

morfológicos que se observan en los cúmulos de galaxias, es posible proponer que las condiciones iniciales prevalecientes en las primeras etapas de formación del Universo fueron las determinantes en la morfología de galaxias. La dificultad que presenta este tercer tipo de modelos es el poder entender cómo podía “saber” una determinada galaxia, al momento de su formación, el medio ambiente en el que se hallaba. Algunas de las variables que se han identificado como responsables de las condiciones iniciales que podrían haber jugado un papel importante en la diferenciación morfológica es el momento angular, es decir la energía involucrada en la rotación de una gran nube protogaláctica que daría origen a la fragmentación de muchas galaxias, cada una de las cuales tendría necesariamente que sufrir efectos de marea por la cercanía de sus vecinas. Se espera que la dependencia de la concentración de galaxias y posiblemente el momento angular en la amplitud de las perturbaciones o fluctuaciones de densidad iniciales, defina eventualmente la relación morfología-densidad observada en galaxias reales.

Los sistemas que tienen una mayor concentración central son también aquellos dominados por componentes esferoidales con momentos angulares específicos menores que sus discos. Si las perturbaciones que produjeron apilamiento de material y, por consiguiente, mayor transformación de gas en estrellas antes de que ocurriera el colapso de la nube protogaláctica para formar un disco gaseoso, entonces las estructuras básicas de las galaxias que ahora vemos, pudieron haberse establecido en las épocas más tempranas del Universo. Este es sin duda el caso de las galaxias elípticas y SO donde la formación estelar agotó el gas, que no se observa en grandes cantidades, sin la intervención de efectos ambientales externos a la galaxia. Estos modelos, sin embargo, no explican satisfactoriamente la influencia del medio ambiente en la evolución posterior a su formación en una galaxia en un cúmulo. Tampoco conocemos con certeza las condiciones que prevalecían en el Universo temprano. Recientemente se ha sugerido que las llamadas galaxias cD o “supergalaxias” contribuyeron a formar concentraciones muy grandes de galaxias en formación, en razón de la gran cantidad de materia que acumulan. Se ha sugerido que, situadas en regiones con fluctuaciones de densidad importantes, actuaron como “semillas” de los cúmulos en cuyas regiones centrales las observamos ahora.

Galaxias en fusión: la evolución de galaxias cD

El estudio de las galaxias cD se originó con el trabajo de Morgan y Mathews en 1964, cuando reportaron la existencia de galaxias muy luminosas, generalmente situadas en las regiones centrales de algunos cúmulos, rodeadas por envoltentes estelares difusas y extendidas (véase el cúmulo de Coma). A estas galaxias se las llamó D y a los casos más extremos de esta clase, se las denotó como cD.

Trabajos posteriores definieron características secundarias para las cD's. Las galaxias cD al igual que sus compañeras más modestas, las D, se encuentran ocasionalmente situadas no sólo en las regiones centrales de cúmulos muy densos, sino en regiones de densidad mayor no siempre centralmente dispues-

tas. Tienen con frecuencia envoltentes estelares muy extensas (≈ 1 Mpc) muy tenues y se encuentran situadas en el centro dinámico (del potencial gravitacional) del cúmulo al que están asociadas. Son más achatadas y están alineadas con la distribución global también achatada del cúmulo mismo. Se ha encontrado que sus colores (que reflejan su contenido de elementos pesados) tienden a ser más rojos a medida que las galaxias son más luminosas (Luger, Recillas-Cruz y colaboradores). Recientemente se han reportado observaciones de núcleos múltiples en los centros de estos fascinantes objetos, observaciones que parecen sugerir que la formación y subsecuente evolución de estas gigantes galaxias es producto de la fusión continua de galaxias de menor masa que han sido atrapadas o bien comparten el campo gravitacional intenso con la cD, en el centro del cúmulo. En la Figura 4 se muestra una de estas galaxias cD identificada como Messier 87 (M87) y que pertenece al cúmulo de Virgo. Esta galaxia también muestra un chorro de material enyectado muy posiblemente de su centro que también es una fuente en emisión muy intensa en diferentes bandas del espectro electromagnético, y radiación no-térmica clasificada como galaxia de núcleo activo. Algunos de estos objetos son las fuentes de energía de origen térmico y no-térmico más intensas que se conocen en el Universo.

Se han propuesto varias teorías para explicar el origen de las galaxias cD. Las simulaciones numéricas de muchos cuerpos utilizando computadoras, han probado ser una herramienta útil para predecir las características observadas de estos objetos. Se ha propuesto que la formación de estas galaxias gigantes es el producto de la fusión y de la agregación de galaxias normales más pequeñas, fenómeno que llamaríamos de “canibalismo galáctico”. El perfil de luz que se produce en algunas de estas simulaciones numéricas debidas a Ostriker y Hausman, White, Aguilar y White y Miller entre otros y que modelan la fusión de galaxias, reproduce correctamente los perfiles de luminosidad observados en galaxias reales, mas no logran construir “galaxias” en las escalas de tiempo que sugiere la observación directa de objetos cD, ni en los números de galaxias cD que se observan. Aun así, la evidencia ya mencionada de la presencia de núcleos múltiples en las regiones centrales de galaxias cD, remanentes de las galaxias “canibalizadas” por la supergalaxia, sería una de las predicciones correctas y más atractivas de la simulación o modelaje numérico de la fusión de galaxias.

Otro interesante y muy actual esquema de formación de galaxias gigantes en cúmulos densos es la hipótesis de los “flujos fríos”. Este mecanismo ha sido propuesto por Fabian Canizares y sus colaboradores, para explicar la detección de rayos-X que evidencian la presencia de grandes cantidades de gas que fluye del medio intercúmulo hacia ciertas galaxias situadas en los centros de los cúmulos. Un modelo muy simple para explicar los flujos fríos, implicaría la agregación de material equivalente a varias decenas a centenas de soles en forma de gas y polvo interestelar, por año. Si la agregación de masa ha ocurrido en forma continua y en un tiempo equivalente a la edad del Universo, la masa acumulada en la región central del cúmulo sería equivalente a la masa que se observa de una galaxia cD. $\diamond$