

FILAMENTOS DE GALAXIAS EN LA ESTRUCTURA INTERNA DE SUPERCÚMULOS DE GALAXIAS

Jerly Alejandra Galeano Correa (1), César Augusto Caretta (2)

1 Pregrado de Astronomía, Universidad de Antioquia (Colombia) | Dirección de correo electrónico: jagc.o6@gmail.com

2 Departamento de Astronomía, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato | Dirección de correo electrónico: caretta@atro.ugto.mx

Resumen

Los Supercúmulos de Galaxias son asociaciones de grupos y cúmulos de galaxias. En su estructura interna presentan regiones concentradas (los grupos y cúmulos de galaxias) y regiones alargadas, a las cuales se les conoce como “filamentos” de galaxias, que suelen conectar a las regiones concentradas. A cada tramo de un filamento que conecta dos cúmulos vecinos de galaxias se denomina un “puente” de galaxias. En el presente trabajo se estudió una muestra de 13 candidatos a filamentos (conteniendo 33 cúmulos) pertenecientes a 7 Supercúmulos, con el objetivo de detectar esos puentes de galaxias y, así, confirmar la existencia de esos filamentos. La muestra de candidatos a filamentos fue obtenida previamente a partir de un catálogo de Supercúmulos de los cúmulos de galaxias de Abell/ACO, limitado a un *redshift* de 0.15 (Chow-Martínez et al., 2014), por Regalado de la Rosa (2015). La información sobre la ubicación espacial de las galaxias que se encontraban entre cada par de cúmulos de un filamento fue obtenida de diferentes bases de datos astronómicas. Como criterios para la identificación de los puentes están la limitación a separaciones físicas relativamente pequeñas (< 20 Mpc) para cada tramo y la existencia de datos observacionales suficientes para identificar este tipo de estructuras. Fueron encontradas 8 estructuras en forma de puentes. La no observación, en el estado actual, de un puente no elimina el filamento como candidato: nuevos datos a ser obtenidos en el futuro pueden “llenar los huecos” en regiones que por el momento carecen de datos y revelar nuevos puentes.

Abstract

Superclusters of Galaxies are associations of groups and clusters of galaxies. Internally they present regions of higher concentrations (the groups and clusters of galaxies) and elongated structures, the last ones known as galaxy “filaments”, which usually connect the denser regions. Each stretch of a filament connecting two neighboring clusters is called a “bridge” of galaxies. In this work we studied a sample of 13 filament candidates (containing 33 clusters) hosted in 7 Superclusters, aiming to detect such bridges of galaxies and, then, confirm the existence of the filaments. The sample of filament candidates was previously obtained from a catalog of Superclusters of Abell/ACO clusters, limited to a redshift of 0.15 (Chow-Martínez et al., 2014) by Regalado de la Rosa (2015). The information about the space location of galaxies in between each pair of clusters of a filament was obtained from different astronomical databases. Among the criteria used to identify the bridges are the limitation of the physical size of each stretch to relatively small values (<20 Mpc) and the existence of available observational data enough for identifying such structures. We found 8 structures forming bridges. The current lack of observing a bridge do not eliminate the filament as a candidate: new data to be obtained in the near future may “fill the gaps” in regions that now do not have them and reveal new bridges.

Palabras Clave

Astrofísica Extragaláctica; Estructura a Gran Escala; Cosmología Observacional; Galaxias: Grupos y Cúmulos; Galaxias: evolución

INTRODUCCIÓN

La Astronomía Extragaláctica es un área que se encarga del estudio de los objetos fuera de la Vía Láctea, consistiendo básicamente de otras galaxias. Estas galaxias no se encuentran distribuidas al azar por el espacio, sino que se agrupan en sistemas de diferentes tamaños que evolucionan de forma jerárquica según sugieren los resultados observacionales y las simulaciones cosmológicas de los últimos 30 años. Entre las diferentes asociaciones de galaxias se tienen los Grupos, Cúmulos y Supercúmulos de Galaxias.

Los Grupos de Galaxias son los agregados más pequeños de esos objetos, contienen típicamente no más de 50 galaxias en un diámetro de aproximadamente 1 Mpc. Cuando las colecciones de galaxias son más pobladas y más grandes que los Grupos se les denominan Cúmulos de Galaxias. Los Grupos y Cúmulos de Galaxias pueden estar a su vez agrupados en Supercúmulos de Galaxias; estas estructuras pueden tener hasta un tamaño superior a 100 Mpc. Esos Supercúmulos exhiben por lo general formas irregulares o filamentosas, y se conectan formando lo que se conoce como la “red cósmica”.

En el presente trabajo se realiza una identificación visual de “puentes” de galaxias en la estructura interna de Supercúmulos, tomando 13 candidatos a filamentos identificados por Regalado de la Rosa [4] a partir del catálogo MSCC de Chow-Martínez et al. [3]. Este es un catálogo de Supercúmulos de Galaxias hasta un $z = 0.15$, basado en una recopilación de corrimientos al rojo para los cúmulos Abell/ACO [1]. Fue construido utilizando un algoritmo *Friends-of-Friends* (FoF, e.g. [2]), el cual se usa frecuentemente para enlazar puntos cuya distribución no es conocida *a priori*, adaptado para permitir dar cuenta de la disminución de la densidad de cúmulos con el *redshift*. Para las identificaciones de los puentes fue necesario el uso de herramientas y bases de datos astronómicas para obtener informaciones sobre galaxias en las regiones de los candidatos a filamentos, como su ubicación espacial (RA, Dec, z) y sus magnitudes en diferentes bandas del espectro. Además de permitir confirmar algunos de los filamentos, esa información nos ayudará a comprender mejor el efecto de dichos ambientes en la evolución de las galaxias y sus sistemas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Para la obtención de datos astronómicos (Ascensión Recta - RA, Declinación - Dec, *redshift* - z , velocidad radial, magnitudes, etc) de las galaxias que se encuentran entre los cúmulos de la muestra de 13 candidatos a filamentos se usaron las bases de datos: NED, VizieR, IRSA, HEASARC y ADS.

NED es una base de datos para objetos extragalácticos que ofrece gran cantidad de mediciones observacionales en múltiples longitudes de onda (abarcando todas las longitudes del espectro). NED puede buscar objetos de muchas maneras, por ejemplo a partir de su nombre, posición, corrimiento al rojo (*redshift*), o por su tipo (por ejemplo: galaxia, QSO, fuente infrarroja).

En especial se utilizaron datos de los catálogos GALEX y 2MASS. El *Galaxy Evolution Explorer* (GALEX) fue un telescopio espacial que observó las galaxias en luz ultravioleta. Su catálogo presenta magnitudes en las bandas FUV y NUV. 2MASS es una base de datos de todo el cielo en tres bandas infrarrojas alrededor de 2 micrómetros (J, H y Ks), en donde 1 millón de fuentes extendidas (galaxias, nebulosas) están catalogados.

Una vez extraídos los datos de las bases de datos astronómicas, para realizar la identificación visual de los puentes de Galaxias en los filamentos se hizo uso de una herramienta llamada TOPCAT (*Tool for Operations on Catalogues And Tables*). TOPCAT es un visor gráfico interactivo y editor de datos, cuyo objetivo es el de satisfacer las necesidades de los astrónomos en el análisis de catálogos y otras tablas. Esta herramienta nos permite visualizar los datos en 1, 2 y 3 dimensiones, calcular las estadísticas, extraer muestras de una tabla de datos, unir tablas, entre otros.

Metodología

Para la identificación de los posibles puentes de galaxias se trabajó con un conjunto de 13 candidatos a filamentos de galaxias, a partir de los cuales se creó entre cada par de cúmulos vecinos (tramo) de un filamento una caja con el objetivo de

extraer información sobre las galaxias contenidas en dicha región. Luego se procedió a calcular las distancias físicas entre cada par de cúmulos por medio de un programa en lenguaje “C”, con el fin de caracterizar la muestra y clasificar los mejores candidatos a filamentos. Esta distancia se obtuvo a partir de las coordenadas cartesianas extragalácticas [X, Y, Z] proporcionadas por Regalado de la Rosa [1] en sus tablas de datos de los cúmulos pertenecientes a los candidatos a filamentos.

Antes de realizar la búsqueda de los datos contenidos en cada región, se procedió a ampliar la caja delimitada por cada par de cúmulos en 3 Mpc perpendicularmente al filamento. La distancia física de 3 Mpc fue transformada en distancia angular en el cielo, para cada sistema, haciendo un promedio de las velocidades radiales (o de los *redshifts*) de cada par de cúmulos [$v_r = c \cdot \langle z \rangle = c \cdot \frac{1}{2}(z_1 + z_2)$, donde c es la velocidad de la luz]. Esta expresión se puede utilizar ya que para galaxias relativamente cercanas z es mucho menor que la unidad y v_r no varía mucho. Luego se hizo una conversión de estas velocidades en distancias usando la “Relación de Hubble” según la cual la velocidad de recesión de los objetos es proporcional a la distancia que estén de nosotros [$d = v_r / H_0$], donde H_0 es la constante de Hubble, la cual para nuestros propósitos tomó el valor de $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Para encontrar el equivalente a 3 Mpc en el cielo solo fue necesario aplicar la ecuación [$\theta = s / d$] ya que anteriormente se había encontrado el valor de la distancia d y finalmente se realizó la conversión a grados [$\theta(^{\circ}) = \theta(\text{rad}) \cdot 180 / \pi$]. Luego fue necesario verificar si el tramo de filamento estaba a lo largo de RA o Dec, calculando la diferencia entre RAs y Decs para saber en qué dirección se debían extender las cajas (es decir, si dos tramos están a lo largo de RA, hay que extender la caja en Dec). La extensión de uno de estos lados se hace sumándole el valor del ángulo encontrado al mayor valor de la coordenada ecuatorial (ya sea la RA o la Dec) y restándole el valor del ángulo al menor valor de la coordenada ecuatorial.

Luego se procedió a bajar los datos sobre las galaxias que estaban delimitadas por cada caja por medio de una de las bases de datos mencionadas anteriormente, NED. En esta base de datos se realizó una búsqueda por parámetros en donde fue necesario ingresar el valor de las coordenadas ecuatoriales (con la RA en grados), se restringió el

redshift a valores $z < 0.15$, mientras el tipo de objeto se restringió a galaxias, galaxias pares, galaxias triples y cuásares, y se modificó las opciones de salida para que arrojará los datos en orden creciente por RA. Una vez se obtuvieron los datos, se tomaron los valores de *redshift* mayores y menores de los cúmulos miembros de cada filamento para restringir los datos de las galaxias encontradas al rango esperado para el filamento y se dio un margen de 3000 km s^{-1} , equivalente a ± 0.01 en *redshift*. Las galaxias en este intervalo eran las candidatas a pertenecer a los posibles puentes entre los cúmulos.

Al tener nuestra muestra de galaxias, se procedió a calcular las densidades de cada caja. Las densidades se calcularon por medio de un programa también en lenguaje informático “C”. Este programa recibe un archivo de datos que contiene la diferencia de las declinaciones, DDEC, la diferencia de la Ascensión Recta, DRA, la diferencia de los *redshifts*, DZ, entre cada par de cúmulos, y el número de galaxias en cada caja, N, y calcula el valor de los volúmenes como $\text{vol} = \text{DDEC} \cdot \text{DRA} \cdot \text{DZ}$ (cada diferencia debidamente transformada a distancias físicas en Mpc). A partir de estos hace el cálculo de las densidades $\rho = N/\text{vol}$ y arroja un archivo de datos con esta información.

Al tener la información sobre la ubicación espacial de cada galaxia en los diferentes tramos, se utilizó la herramienta TOPCAT. Para este propósito se escogió ubicar los datos en un cubo cuyos ejes estaban dados por AR, Dec y z . Con esta herramienta se pudo hacer una identificación visual de los posibles puentes existentes en cada tramo.

El siguiente paso fue buscar datos fotométricos para las galaxias seleccionadas por medio de las bases de datos GALEX y 2MASS. De GALEX se obtuvieron las magnitudes FUV y NUV, con sus respectivas incertidumbres, y el índice de color, B-V, además de la información sobre la posición e IDs de cada objeto. De la base de datos 2MASS se obtuvieron las magnitudes J_{K20} , H_{K20} y K_{K20} (magnitudes medidas dentro de la isofota de $20 \text{ mag. arcsec}^{-2}$ en la banda K), con sus respectivas incertidumbres e IDs.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al realizar el procedimiento anteriormente descrito se obtuvieron 10 tramos (en 8 filamentos) que cumplían con las características visuales para ser candidatos a puentes de galaxias. En la Imagen 1 se muestran las figuras 3D de 4 de estos 10 tramos. Aunque TOPCAT es una herramienta bastante eficiente para visualizar los datos de la muestra, la decisión sobre la existencia o no de un puente depende del criterio del investigador. Para aplicar criterios más cuantitativos se pretende, en el futuro cercano, desarrollar un algoritmo matemático que nos permita medir propiedades de los puentes en los filamentos de galaxias y apoyar en la decisión.

Por ejemplo, Tempel et al. [5] desarrollaron un algoritmo que está basado en el modelo estadístico *bisous* y que consiste en la construcción de cilindros que contienen un radio de interacción de 0.5 Mpc. Estos cilindros permiten ubicar los posibles puentes utilizando la distribución de probabilidad de Poisson. La condición para que estos cilindros formen filamentos es que dos o más cilindros estén conectados y que hayan más galaxias dentro del cilindro que fuera de él.

Sin embargo aunque esta idea nos plantea otra alternativa para buscar patrones hay que tener en cuenta que los puentes de galaxias no necesariamente están alineados con los cúmulos como se plantea en el artículo de Tempel et al., sino que se pueden encontrar caminos alternativos que unan los cúmulos.

CONCLUSIONES

- No se encontró una relación directa entre la distancia que separa cada par de cúmulos y la existencia de puentes (no hay mayor probabilidad de puente si la separación entre el par es menor, p.ej.). Este resultado pudo haber sido causado por la poca información disponible de algunas regiones del cielo.
- La cantidad de galaxias contenidas en cada caja es un buen parámetro a la hora de seleccionar los filamentos con mayor probabilidad de presentar puentes galácticos.
- Se encontraron un total de 10 tramos que presentan estructuras en forma de puentes.
- De los tramos que presentan puentes de galaxias solo 2 forman parte del mismo filamento (2056A-2065-2089) y cuentan con una separación de ~ 19.9 Mpc entre los cúmulos más alejados. En la mayoría de los filamentos, solo se formaron puentes en 1 tramo.
- En el tramo 2056A-2065 se pudieron identificar 3 posibles puentes (por encima, por debajo y entre el par de cúmulos).
- Un análisis visual es un método importante a la hora de identificar estructuras. Sin embargo es necesaria la elaboración de un modelo matemático que vaya de la mano con este, para sí tener mayor confiabilidad de la estructura encontrada.
- La identificación de puentes de galaxias es importante para entender la distribución de la materia en el Universo a gran escala, así como para el entendimiento de la evolución de los cúmulos mismos y de las galaxias que lo forman.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Chow-Martínez et al. y a Regalado de la Rosa ya que sin su catálogo de Supercúmulos y sus candidatos a filamentos respectivamente no se hubiera podido llevar a cabo la presente investigación.

También quiero agradecer a mi asesor, Dr. César Augusto Caretta, por el valioso conocimiento que compartió durante esta estancia de investigación y por permitir que estudiantes de otras ciudades y países pudieran participar de este proyecto.

Por último agradezco a la Universidad de Guanajuato, en especial al programa de Veranos de Investigación Científica, por la oportunidad de participar del cotidiano académico y científico, posibilitando el intercambio de ideas, integración con otros estudiantes y la inmersión en la cultura de otro país.

Tabla 1: Información sobre la muestra de estudio (13 candidatos a filamentos): (1) ID del supercúmulo en el catálogo MSCC (Chow-Martínez et al., 2014); (2) designación del candidato a filamento; (3) par de cúmulos que constituyen un tramo; (4) separación del par cúmulos (en Mpc); (5) número de galaxias con velocidad radial dentro de la caja encontradas con NED; (6) resultados de la búsqueda por puentes de galaxias. En rojo se destacan los resultados negativos (separaciones muy grandes, pocas galaxias observadas hasta el momento y falta de un puente) y en negro los resultados positivos (tramos y filamentos con puentes confirmados).

MSCC	Fil.	Tramo	Separación (Mpc)	N _{gal}	¿Puente?
414 (Boo)	f1	1869A-1873B	6.8	44	No
		1873B-1903A	12.5	123	Si
	f4	1832A-1869B	12.5	47	No
		1869B-1873C	8.1	68	No
463 (CrB)	f2	2056A-2065	7.7	217	Si
		2065-2089	12.2	318	Si
	f1	2073A-2079A	4.5	154	Si
		2079A-2092A	12.5	303	No
	f3	2059A-2061A	16.0	118	No
		2061A-2067A	5.6	188	Si
53	f0	2871B-2856	20.4	9	No
		2856-2860E	13.6	34	No
73 (Cet-S)	f1	0282-0298A	25.9	33	No
		0298A-0317	31.6	8	Si
		0317-0328e	25.4	19	No
	f2	0176B-0190C	36.7	5	No
		0190C-0186B	7.0	115	No
		0186B-0188	29.4	14	No
76 (Cet-N)	f1	0271-0267C	18.8	13	No
		0267C-0279B	17.8	5	No
	f2	0285-0268B	30.1	83	No
		0268B-0267C	20.7	8	No
		0267C-0261B	37.4	5	No
0261B-0256C	20.8	61	No		
68	f1	2932B-2931A	17.5	33	No
		2931A-2923D	13.4	36	Si
	f2	2920A-2913	21.3	179	No
		2913-2898A	29.3	14	No
		2898A-2909	24.1	39	Si
		2909-2911E	8.3	63	Si
84 (ForScl)	f1	2950B-2944A	16.8	66	Si
		2944A-0264	19.6	49	No
		0264-2950A	16.9	29	No

REFERENCIAS

Andernach, H., Tago, E., Einasto, M., Einasto, J. & Jaaniste, J. (2005). Redshifts and Distribution of ACO Clusters of Galaxies (pp. 283-287). En: Fairall A. P. & Woudt P. A. (Eds.), Nearby Large-Scale Structures and the Zone of Avoidance. ASP Conf. Ser. Vol. 329, San Francisco.

Caretta, C.A., Rosa, R.R., de Campos Velho, H.F., Ramos, F.M. & Makler, M (2008). Evidence of turbulence-like universality in the formation of galaxy-sized dark matter haloes. A&A 487, 445-451.

Chow-Martínez, M., Andernach, H., Caretta, C.A. & Trejo-Alonso, J.J. (2014). Two new catalogs of superclusters of Abell/ACO galaxy clusters out to redshift 0.15. MNRAS 445, 4073-4085.

Regalado de la Rosa, J.L. (2015). Estudio de la estructura interna de supercúmulos de galaxias (Tesis de Licenciatura). León: Universidad de Guanajuato.

Tempel, E., Stoica, R.S., Martínez, V.J., Liivamägi, L.J., Castellan, G. & Saar, E. (2014). Detecting filamentary pattern in the cosmic web: a catalogue of filaments for the SDSS. MNRAS 438, 3465-3482.

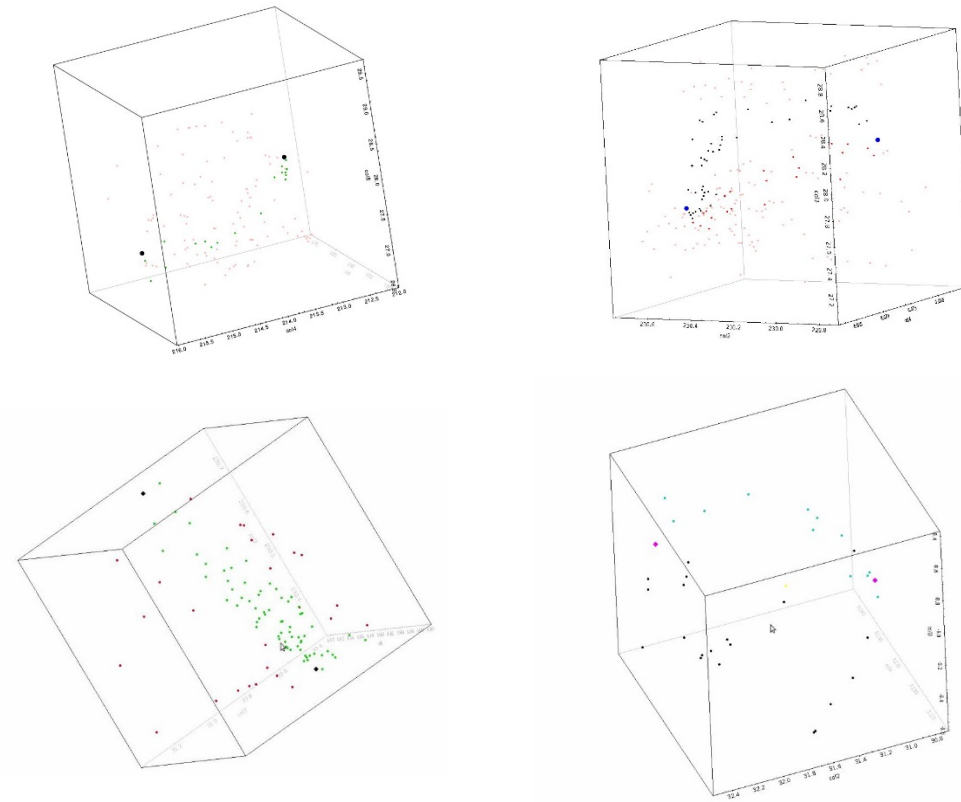


IMAGEN 1: Ejemplos de algunos puentes de galaxias encontrados en los filamentos de la muestra. La caja superior izquierda corresponde al puente encontrado entre los cúmulos 1873B--1903A; la caja inferior izquierda al puente entre los cúmulos 2061A--2067A; la caja superior derecha al puente entre 2056A--2065 y la caja inferior derecha al puente entre 0298A—0317.