

LAS ESTRUCTURAS/SISTEMAS MÁS GRANDES QUE AÚN PODRÁN SER FORMADAS EN EL UNIVERSO

César A. Caretta ^{a,*}

^a Departamento de Astronomía, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato,
Universidad de Guanajuato, c.augusto@ugto.mx

Resumen

Con el fin de discutir la cuestión de cuáles serán los mayores objetos que resistirán a la implacable dispersión por cuenta de la expansión acelerada del Universo, explicaré como se forman y evolucionan los sistemas y las estructuras astrofísicas a escalas muy grandes, como las vemos en el presente y como se estima cuales podrán sobrevivir en el futuro.

Palabras clave: estructura-a-gran-escala; galaxias:sistemas de; colapso gravitacional; entropía; zonas de nucleación.

THE LARGEST STRUCTURES/SYSTEMS THAT MAY STILL BE FORMED IN THE UNIVERSE

Abstract

Aiming to discuss the question of which will be the largest objects that can resist relentless dispersion due to the accelerated expansion of the Universe, I will explain how systems and structures of galaxies in the largest scales are formed and evolve, how do we see them in the present and how do we estimate which of these will be able to survive in the future.

Keywords: large-scale-structure; galaxies:systems; gravitational-collapse; entropy; nucleation-zones.

1. Introducción

La evolución de nuestro Universo, especialmente en las mayores escalas, depende de la acción de dos entes físicos básicos: la **gravedad** y la **entropía**. Mientras que la evolución tiende a diluir la organización para buscar estados de mayor entropía, la gravedad es el agente que condensa y forma los sistemas y estructuras.

En escalas astrofísicas, los sistemas (planetas, estrellas, cúmulos de estrellas, galaxias, grupos, cúmulos y supercúmulos de galaxias, *etc.*) empiezan como una **perturbación** en el campo de densidades que, por un proceso de contracción gravitacional, se destacan del entorno en expansión, llegan a un volumen máximo, **colapsan** y, finalmente, alcanzan un estado de **equilibrio** (relajación, con un máximo local de entropía). Durante el proceso, la misma gravedad agrega partes externas al sistema, al mismo tiempo que partes internas menores evolucionan más rápidamente que las mayores, imprimiéndole un carácter **jerárquico** a la formación de estructuras.

En el presente artículo, nos concentraremos en el proceso de formación de sistemas y estructuras en el Universo, buscando contestar la siguiente pregunta: ¿qué es lo

más grande que el Universo fue o será capaz de formar en el futuro, sabiéndose que se encuentra en un estado de expansión acelerada?

2. El pasado

2.1. Las perturbaciones primordiales de densidad

Sabemos con cierta seguridad que, en un determinado momento en el pasado, unos 380 mil años después del *Big-Bang* (en términos astrofísicos, en un *redshift*, $z \sim 1100$), el Universo no tenía todavía estructuras o sistemas, pero una gran cantidad de **fluctuaciones**, en diferentes escalas, sobre una distribución **globalmente homogénea** de densidades de materia oscura, materia bariónica y radiación. Eso lo conocemos porque las marcas de esas fluctuaciones son claramente visibles en los mapas de anisotropías de la radiación cósmica de fondo observada en el rango de microondas (CMB, por sus siglas en inglés de "*cosmic microwave background*"; por ejemplo, Partridge 2019). El conjunto de esas fluctuaciones en diferentes escalas forma lo que llamamos **espectro de potencia** de la CMB.

La radiación cósmica de fondo

La CMB fue generada por el desacoplamiento de la radiación primordial (fotones) del contenido de materia bariónica* (átomos) del Universo. Antes de ese episodio, los fotones y las partículas materiales subatómicas formaban una sopa cósmica en la cual las fluctuaciones oscilaban en tiempo y espacio. Después, los fotones se desacoplaron de la materia y pudieron viajar libremente por el Universo, siendo en la actualidad observados igualmente en todas las direcciones. Aunque su temperatura era mucho mayor al inicio (~ 3000 K), actualmente, con la disminución de la densidad de esos fotones, por el aumento del volumen del Universo, su temperatura es de 2.7255 ± 0.0006 K (por ejemplo, Fixsen 2009).

* son llamadas genéricamente de bariones todas las partículas con masa significativa, aunque estrictamente hablando son bariones solamente los hadrones (partículas pesadas) formadas por 3 quarks.

2.2. Las componentes del Universo

Hay tres hechos importantes para nuestra discusión que ocurrieron antes de la liberación de la CMB: la formación de los núcleos atómicos, el desacoplamiento de la materia oscura y la formación de los átomos. En el siguiente orden, primero la temperatura del Universo baja a algo del orden de la temperatura del interior de nuestro Sol (10^9 — 10^7 K), propiciando la formación de núcleos principalmente de helio (He) por fusión termonuclear (**nucleosíntesis primordial**); después **la materia oscura se desacopla** y, por fin, hay un periodo de **recombinación** en el cual los núcleos recién formados de He, núcleos pesados de H (deuterio y tritio), entre otros, y los propios protones (núcleos de H) capturan los electrones libres formando átomos neutros.

Pero, para la formación de estructuras, interesa más el desacoplamiento de la materia oscura. **La materia oscura** es un componente del Universo todavía no comprendido completamente o, en otras palabras, aún no detectado directamente. No se sabe si está compuesta de partículas (por ejemplo, Tanabashi y col., 2018), pero sí se sabe que produce gravedad, su única forma de interactuar con la materia bariónica. Como la

materia oscura no se acopla directamente a los fotones, ella pudo liberarse de la sopa cósmica antes de que los fotones lo hicieran. Ese hecho fue fundamental para hacer crecer las perturbaciones de materia oscura antes de que las de materia bariónica pudieran también hacerlo (Kuhlen y col., 2012), y que así pudiéramos detectarlas como anisotropías sobre la CMB. Con el desacoplamiento de los fotones, los bariones se quedaron también libres y fueron, entonces, capturados por los proto-pozos de potencial gravitacional generados por las perturbaciones de materia oscura.

Al caer en dichos pozos, parte de la materia bariónica se convirtió rápidamente en sistemas de pequeña escala, formando cúmulos de estrellas (mayormente globulares), formando después galaxias en una combinación de colapso monolítico con aglomeración jerárquica. Otra parte de esa materia nunca logró disipar energía suficiente para condensarse en galaxias, pasando a ser comprimida y calentándose por la propia gravedad de esos pozos. Ese gas, que hoy es suficientemente caliente para ser detectado en el rango de rayos-X, forma el medio intracumular (ICM), medio intragrupo (IGM) y el medio intergaláctico caliente-tibio (WHIM).

El espectro de potencia de la CMB

Es importante destacar la característica multiescalar de las perturbaciones de densidad que existían cuando empezó el proceso de formación de estructuras: las perturbaciones que después generaron los cúmulos de estrellas estaban dentro de las perturbaciones que generaron las galaxias, esas dentro de perturbaciones mayores que generaron grupos y cúmulos de galaxias, y de ahí en adelante. Otra propiedad importante es que el crecimiento de esas perturbaciones es jerárquico (de abajo hacia arriba) es decir, las perturbaciones más pequeñas colapsan más rápidamente que las más grandes, y así sucesivamente*. Sabemos eso porque las observaciones y las simulaciones de N-cuerpos (por ejemplo, Davis y col. 1985) nos indican que la materia oscura es predominantemente fría (es decir, si formada de partículas, esas partículas son masivas y relativamente lentas).

* De hecho, perturbaciones demasiadamente grandes nunca tendrán tiempo suficiente para colapsar porque el Universo es relativamente joven y está en expansión acelerada.

2.3. La formación de estructuras

En el proceso de formación de estructuras, una perturbación de densidad primero se desacopla del entorno haciéndose más densa que ese. El efecto de la expansión del Universo sigue efectivo, pero empiezan a ocurrir dos fenómenos que la contrarrestan: la propia gravedad y una cierta presión generada por el movimiento interno de los componentes de la perturbación (por ejemplo, Zúñiga y col., 2024). La competencia entre esos tres fenómenos define toda la historia futura de la perturbación: si la presión interna vence, la región regresa al estado de expansión del entorno, mientras que, si la gravedad vence las otras dos, el colapso continúa. El primer caso era el que llevaba a la oscilación de las perturbaciones en el período anterior al equilibrio entre materia y energía (CMB). El segundo lleva al colapso realmente, que empieza a dominar cuando la densidad de la perturbación alcanza un contraste de densidad de alrededor de 6 (es decir, que la densidad de la perturbación alcanza un valor 6 veces superior a la densidad de su entorno). A partir de ese punto la densidad deja de tener influencia del flujo de Hubble (la expansión) –decimos que el sistema está ligado– y el colapso pasa a ser

inevitable. Ese punto es llamado de *turn-around* (por ejemplo, Padmanabhan, 1993).

Por otro lado, la presión no deja de existir y, de hecho, se hace mayor cuanto más concentrada está la materia. La materia necesita aumentar su velocidad (y presión) para no dejar que el colapso lleve el sistema a una situación extrema, que sería una singularidad tipo agujero negro.

Singularidades tipo agujeros negros

Efectivamente algunos sistemas no resisten y finalmente alcanzan su horizonte de sucesos. Ese es el caso, p.ej., de estrellas de alta masa – después de haber resistido con sus presiones electrónica y de radiación, seguida de su presión de degeneración de neutrones y de quarks, finalmente sucumben.

De hecho, la mayor parte de los sistemas encuentra una forma de resistir y llega, finalmente, a una etapa de equilibrio dinámico (**virilización**) donde la gravedad es contrarrestada por esas presiones internas (como la rotación, para objetos como el Sistema Solar, la dispersión de velocidades, para objetos como grupos y cúmulos de galaxias, o una combinación de ambos, típica de galaxias).

3. El presente

3.1 Sistemas y estructuras

A partir de los procesos descritos arriba, se pudieron formar todo lo que observamos actualmente en el cielo, desde planetas y satélites naturales hasta los mayores supercúmulos de galaxias (por ejemplo, Caretta y col., 2002). Aquí cabe una aclaración sobre la denominación de esos objetos astrofísicos: llamaremos **sistemas** a los objetos compuestos de elementos menores y que ya alcanzaron cierto grado de relajación, como cúmulos de estrellas, grupos y cúmulos de galaxias, mientras que, a los objetos más grandes, que por ende no han alcanzado todavía el estado de equilibrio, les llamaremos **estructuras**.

Como nos interesan los objetos más grandes que se pueden formar en el Universo, necesitamos caracterizar un poco más los sistemas y estructuras que encontramos actualmente. A gran escala, los objetos con mayor avance en el proceso de virilización son los **grupos y cúmulos de galaxias**. Esos sistemas sufrieron un colapso predominantemente esférico y, a lo largo del camino, fueron posiblemente fusionándose con otros similares o acretaando sistemas menores. Efectivamente los vemos como

regiones en el cielo con una gran concentración de galaxias, gas intracumular caliente y materia oscura. También vemos que frecuentemente presentan subestructuras, marcas de fusiones y acreciones recientes (por ejemplo, Caretta y col., 2023).

Evidentemente, las fusiones y acreciones se interponen en el camino de la virilización de esos sistemas. Si el sistema es dejado relativamente aislado, sus subestructuras internas van a disolverse con el tiempo (entre otros efectos no disipativos, véase, Zúñiga y col. 2024, y referencias contenidas en ese), haciendo aumentar su entropía. Transcurrido suficiente tiempo, el sistema se hace homogéneo (más precisamente, en una estructura núcleo-halo) y la entropía va a llegar a un nivel **máximo** (al menos local), a partir del cual se pierde la memoria de los procesos de formación. El sistema llega, entonces, a su **virilización**. Sin embargo, si el sistema se encuentra en un ambiente más poblado, sufrirá diferentes etapas de fusión y acreción y, aunque ya haya llegado a un máximo local de entropía, retoma su proceso de búsqueda por la relajación y nuevo aumento de entropía, es decir, puede pasar por varios de esos ciclos.

La red cósmica

Efectivamente, esos sistemas, grupos y cúmulos de galaxias, están generalmente inmersos en una estructura más grande, la Estructura a Gran Escala (LSS, por sus siglas en inglés de "Large-scale Structure"). Como la vemos actualmente, podemos identificar una configuración bimodal: algunas regiones presentan una muy baja densidad de objetos y sistemas, formando inmensos vacíos cósmicos, mientras que otras exceden cierto umbral de densidad, formando paredes que delimitan dichos vacíos cósmicos. Claramente el proceso de colapso gravitacional sigue juntando materia en ciertas regiones (bases de atracción), mientras que otras se quedan cada vez más desproveídas de ese relleno (bases de repulsión). Esa es la llamada "red cósmica" o "telaraña cósmica" haciendo alusión directa a su forma.

En verdad la "red cósmica" es más compleja que una simple configuración bimodal. Aunque no tenemos un modelo teórico completo para la formación de estructuras en todas sus etapas, especialmente después que el colapso entra a un régimen no-lineal (y tenemos que apoyarnos en simulaciones de

N-cuerpos), sabemos que el colapso no tiene que ser esférico. Efectivamente, el mejor modelo que tenemos es la **Aproximación de Zel'dovich** (Zel'dovich, 1970), que nos propone que las 3 diferentes direcciones espaciales pueden colapsar cada una a su turno. En ese caso, si una perturbación colapsa solo en una dirección, irá formar una estructura en forma de pared (o *panqueca*, utilizando un término común de la época de la propuesta de Zel'dovich). Esas estructuras efectivamente dominan en primer orden las bases de atracción que se comentó arriba. Por otro lado, si una segunda dirección también colapsa, la estructura adquirirá la forma de un filamento. Esos son los filamentos de galaxias, claramente detectables en los estudios de la distribución de galaxias a gran escala (por ejemplo, Santiago-Bautista y col., 2020). Forman los canales por donde se mueve el material en las bases de atracción. Por fin, si el colapso se da también en la tercera dirección tenemos un colapso final similar al esférico, y formamos estructuras llamadas nudos y nodos. La diferencia es que los **nudos** (*knots* en inglés) son concentraciones a lo largo de los filamentos, mientras que los **nodos** (*nodes* en inglés) son regiones donde se cruzan filamentos. En la práctica, los nudos son normalmente grupos o

cúmulos pobres de galaxias, mientras que en los nodos se forman los cúmulos más ricos en galaxias.

4. El futuro

4.1 Zonas de nucleación

La percepción de la LSS como una configuración bimodal nos lleva a considerar que podemos **dividir el Universo completamente en células** (también llamadas de *cocoons* (por ejemplo, Dupuy y col., 2019). En ese contexto, las mayores estructuras del Universo son esas bases de atracción, como es el caso de Laniakea, el *cocoon* del cual somos parte (**Figura. 1**).

Laniakea

Recordemos que la Vía Láctea es parte de un grupo de galaxias, el **Grupo Local** (junto a las galaxias Andrómeda y Triángulo, además de otras casi 100 enanas satélites), que es parte de **Supercúmulo de Virgo (Figura. 1)**, y que, a su vez, y junto a otros supercúmulos como *Fornax*, *Hydra-Centaurus*, *Ophiucus* y *Pavo-Indus* forman la gran estructura llamada **Laniakea** (Tully y col., 2014).

Esos *cocoons* son los candidatos obvios a mayores estructuras. Sin embargo, ya tenemos claro actualmente que dichas

estructuras son demasiado dispersas para que puedan sobrevivir a la infame expansión acelerada del Universo. En sus límites, el contraste de densidad que tienen es ligeramente positivo, lejos de un posible umbral mínimo necesario para su colapso.

Busquemos, entonces, regiones que tienen un **contraste significativo de densidad**. Ese trabajo ha sido hecho desde cuando se descubrió que los sistemas de galaxias (grupos y cúmulos) se agrupan en sistemas de segundo orden (por ejemplo, Abell, 1961), los cuales actualmente llamamos **supercúmulos de galaxias**. Inúmeros catálogos de esos supersistemas fueron construidos desde entonces (por ejemplo, Einasto y col., 2001; Adami y col., 2018), y varias consideraciones sobre la sobredensidad fueron planteadas y probadas. Se encuentra que aproximadamente un 50% de los grupos y cúmulos de galaxias son miembros de supercúmulos (por ejemplo, Chow-Martínez y col., 2014). Definitivamente son buenos candidatos a ser las mayores estructuras del Universo. Pero nos falta probar si realmente resistirán a la expansión acelerada.

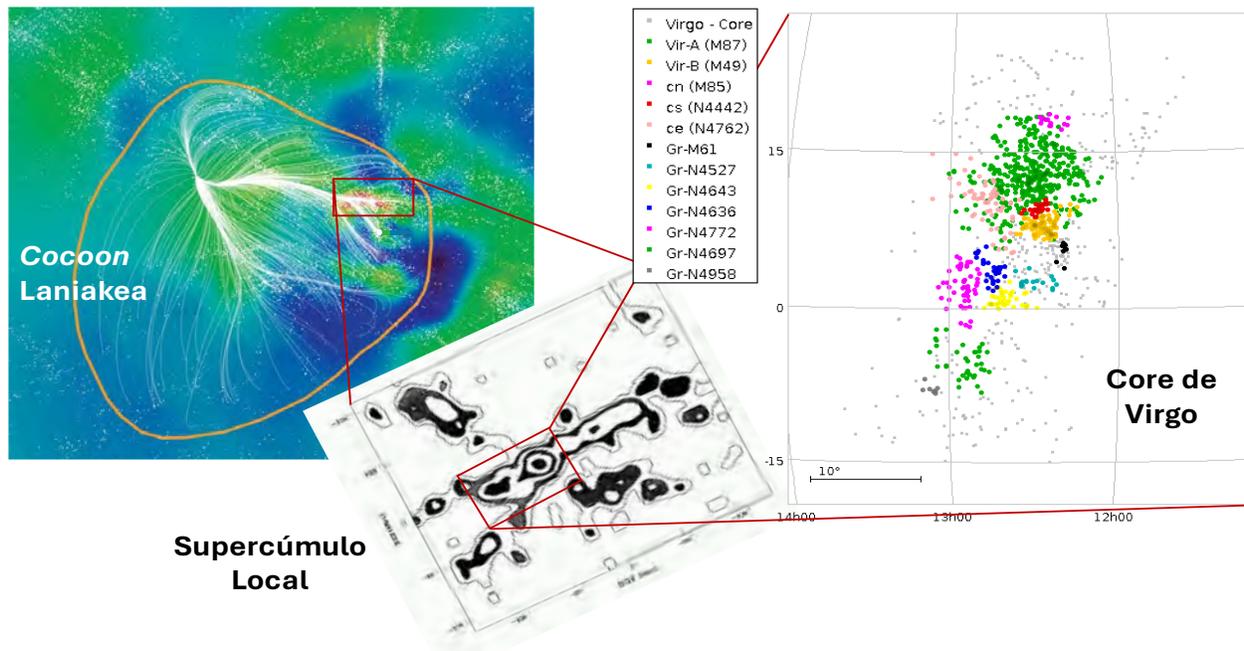


Figura 1. Composición sobre figuras extraídas de Tully (1982) y Tully y col. (2014). En el panel de la izquierda se ve la representación de Laniakea, nuestro *cocoon* (Tully y col. 2014): los puntos blancos representan galaxias individuales, mientras que las líneas representan trayectorias futuras probables de esos puntos; la proyección está sobre los ejes supergalácticos SGX×SGY. En la figura del centro se muestra una representación del Supercúmulo Local (también llamado Supercúmulo de *Virgo*, Tully 1982), en contrastes de densidad y coordenadas SGX×SGZ. Finalmente, el panel de la derecha muestra la distribución de sistemas de galaxias que componen al *core* (zona de nucleación) del Supercúmulo de *Virgo*: los puntos de diferentes colores representan galaxias miembros de distintos sistemas (el cúmulo principal, en verde, 4 subestructuras y 7 grupos de galaxias), proyectadas en el plano del cielo (RA×Dec).

Contrastes de densidad

Muchos autores han estudiado las condiciones de colapso, ligación y virialización de manera teórica o a partir de simulaciones (por ejemplo, Gramann y Suhhunenko 2002; Chiueh y He 2002; Nagamine y Loeb 2003; Dünner y col.

2006; Araya-Mello y col. 2009; Chon y col. 2015) y ya hay cierta convergencia sobre cuáles serían los criterios. Aunque los umbrales son calculados para sobredensidades esféricas, son aproximaciones razonables para estructuras realistas. Según esas estimativas, para el tiempo presente el

umbral de densidad para las estructuras que ya se encuentran en su radio de *turn-around* es un contraste respecto al entorno de aproximadamente 13 (Chon y col. 2015; Einasto y col. 2020), equivalente a un contraste de 2.65 respecto a la densidad crítica*. Análogamente, para estructuras que pueden todavía colapsar en el futuro, el contraste es de aproximadamente 8, equivalente a un contraste de 1.36 respecto a la densidad crítica (por ejemplo, Zúñiga y col., 2024b).

* valor de referencia para la densidad promedio de materia y energía del Universo bajo el cual el Universo tiene una geometría Euclidiana (curvatura plana). Densidades promedias inferiores representan geometrías abiertas (hiperbólicas) y densidades promedias superiores, geometrías cerradas (esféricas).

En efecto, la propia definición de supercúmulos de galaxias ha sido cuestionada bajo esa perspectiva de ser estructuras ligadas y en colapso. De todos modos, si no son los supercúmulos los objetos que resistirán en el futuro, al menos nuestros candidatos deben estar en su interior. Estudiando la **estructura interna** de los supercúmulos encontramos

que son formados por nodos, filamentos, nudos, en una estructura global en forma de pared, como descrito anteriormente. Entre esas subunidades, las más densas son, inequívocamente, los nodos. Efectivamente, los nodos pueden ser descritos como **zonas de nucleación**, es decir, las regiones más sujetas a concentrar materia en el Universo actual.

Nuestro grupo ha combinado la información de los umbrales de densidad mínimos necesarios para resistir a la expansión acelerada y estudiado una muestra de esas zonas de nucleación (también llamadas **cores** de supercúmulos) de todo el Universo Local ($z < 0.15$). Con eso hemos producido el primer **catálogo de cores de supercúmulos** de galaxias, donde fueron identificados 105 de esas zonas de nucleación en 53 supercúmulos ricos (aquellos con al menos 5 cúmulos miembros) de galaxias (Zúñiga y col., 2024b). Ese catálogo confirma varios **cores** identificados previamente de forma puntual en la literatura (por ejemplo, Bardelli y col. 1994; Small y col. 1997; Luparello y col. 2011; Heinämäki y col. 2022).

5. Conclusiones

Así, según el escenario cosmológico más aceptado actualmente, el Universo seguirá su expansión acelerada indefinidamente,

separando cada vez más los objetos remanentes, disminuyendo su actividad a la medida que se enfría. Las estructuras que seguirán todavía evolucionando hacia un estado de relajación dinámica serán esos *cores* de supercúmulos de galaxias. Cada uno de esos *cores* seguirá acretando materia hasta que toda ella esté concentrada en un "mega-cúmulo" de galaxias finalmente virializado. Esos mega-cúmulos serán, por lo tanto, los mayores sistemas que el Universo será capaz de formar.

La zona de nucleación más cercana a nosotros es el **core del supercúmulo de Virgo (Figura.1)**, centrado en el actual cúmulo de Virgo. Nosotros, la Vía Láctea, sin embargo, no estamos dentro del radio de influencia de ese *core* (Chon y col., 2015), y seguiremos vagando en el mar de la expansión, en esos entonces ya fusionados con la galaxia de Andrómeda y con las enanas satélites del Grupo Local.

Referencias bibliográficas

Abell, G.O. (1961). Evidence regarding second-order clustering of galaxies and interactions between clusters of galaxies. *AJ*, 66, 607–613.

Adami, C.; Giles, P.; Koulouridis, E.; Pacaud, F.; Caretta, C.A.; Pierre, M. y col. (2018). The XXL Survey. XX. The 365 cluster catalogue. *A&A*, 620, A5 (pp.28).
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731606>

Araya-Melo, P.A.; Reisenegger, A.; Meza, A.; van de Weygaert, R.; Dünner, R.; Quintana, H. (2009). Future evolution of bound superclusters in an accelerating Universe. *MNRAS*, 399 (1), 97–120.

Bardelli, S.; Zucca, E.; Vettolani, G.; Zamorani, G.; Scaramella, R.; Collins, C.A.; MacGillivray, H.T. (1994). A study of the core of the Shapley concentration - I. The sample. *MNRAS*, 267, 665–691.

Caretta, C.A.; Maia, M.A.G.; Kawasaki, W.; Willmer, C.N.A. (2002). The Aquarius Superclusters. I. Identification of Clusters and Superclusters. *AJ*, 123 (3), 1200–1215.
<https://doi.org/10.1086/338894>

Caretta, C.A.; Andernach, H.; Chow-Martínez, M.; Coziol, R.; De Anda-Suárez, J.; Hernández-Aguayo, C.; Islas-Islas, J.M.; Mireles-Vidales, M.M.; Muñoz-Torres, M.A.; Santoyo-Ruiz, H.; Trejo-Alonso, J.J.; Venkatapathy, Y.; Zúñiga, J.M. (2023). Tracing the Assembly Histories of Galaxy

Clusters in the Nearby Universe. *RMxAA*, 59, 345–377.

<https://doi.org/10.22201/ia.01851101p.2023.59.02.13>

Chiueh, T.; He, X.-G. (2002). Future island universes in a background universe accelerated by a cosmological constant and by quintessence. *Physical Review D*, 65 (12), 123518.

Chon, G.; Böhringer, H.; Zaroubi, S. (2015). On the definition of superclusters. *A&A*, 575, L14 (pp.5).

Chow-Martínez, M.; Andernach, H.; Caretta, C.A.; Trejo-Alonso, J.J. (2014). Two new catalogues of superclusters of Abell/ACO galaxy clusters out to redshift 0.15. *MNRAS*, 445 (4), 4073–4085.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stu1961>

Davis, M.; Efstathiou G.; Frenk, C.S.; White, S.D.M. (1985). The Evolution of LSS in a Universe dominated by Cold Dark Matter. *ApJ*, 292, 371–395.
<https://doi.org/10.1086/163168>

Dünner, R.; Araya, P.A.; Meza, A.; Reisenegger, A. (2006). The limits of bound structures in the accelerating Universe. *MNRAS*, 366 (3), 803–811.

Dupuy, A.; Courtois, H.M.; Dupont, F. y col. (2019). Partitioning the Universe into gravitational basins using the cosmic velocity field. *MNRAS*, 489(1), L1–L6.
<https://doi.org/10.1093/mnras/1slz115>

Einasto, M.; Einasto, J.; Tago, E.; Müller, V.; Andernach, H. (2001). Optical and X-Ray Clusters as Tracers of the Supercluster-Void Network. I. Superclusters of Abell and X-Ray Clusters. *AJ*, 122(5), 2222–2242.
<https://doi.org/10.1086/323707>

Einasto, M.; Deshev, B.; Tenjes, P. y col. (2020). Multiscale cosmic web detachments, connectivity, and preprocessing in the supercluster SC1 A2142 cocoon. *A&A*, 641, A172 (pp.19). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037982>

Fixsen, D.J. (2009). The Temperature of the Cosmic Microwave Background. *ApJ*, 707 (2), 916–920. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/707/2/916>. [S2CID 119217397](https://arxiv.org/abs/1102.1739)

Gramann, M.; Suhhonenko, I. (2002). Dynamical state of superclusters of galaxies: do superclusters expand, or have they started to collapse? *MNRAS*, 337 (4), 1417–1425.

Heinäpäki, P.; Teerikorpi, P.; Douspis, M.; Nurmi, P.; Einasto, M.; Gramann, M.; Nevalainen, J.; Saar, E. (2022). Quasi-

spherical superclusters. *A&A*, 668, A37 (pp.14). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244239>

Kuhlen, M.; Vogelsberger, M.; Angulo, R. (2012). Numerical simulations of the dark universe: State of the art and the next decade. *Phys. Dark Universe*, 1, 50–93. <https://doi.org/10.1016/j.dark.2012.10.002>

Luparello, H.; Lares, M.; Lambas, D.G.; Padilla, N. (2011). Future virialized structures: an analysis of superstructures in the SDSS-DR7. *MNRAS*, 415 (1), 964–976.

Nagamine, K.; Loeb, A. (2003). Future evolution of nearby large-scale structures in a universe dominated by a cosmological constant. *New Astronomy*, 8 (5), 439–448.

Padmanabhan, T. (1993). *Structure formation in the Universe*, Cambridge University Press.

Partridge, R.B. (2019). The cosmic microwave background: from discovery to precision cosmology. En: H. Kragh y M.S. Longair (Eds.). *The Oxford Handbook of the History of Modern Cosmology* (pp. 292—345). Oxford University Press.

Santiago-Bautista, I.; Caretta, C.A.; Bravo-Alfaro, H.; Pointecouteau, E.; Andernach, H. (2020). Identification of filamentary

structures in the environment of superclusters of galaxies in the Local Universe. *A&A*, 637, A31 (pp.26). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936397>

Small, T.A.; Sargent, W.L.W.; Hamilton, D. (1997). The Norris Survey of the Corona Borealis Supercluster. I. Observations and Catalog Construction. *ApJS*, 111 (1), 1–71.

Tanabashi M.; Hagiwara, K.; Hikasa, K. y col. (2018). Review of Particle Physics. *Phys. Rev. D*, 98, 030001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.030001>

Tully, R.B. (1982). The Local Supercluster. *ApJ* 257, 389–422.

Tully, R.B.; Courtois, H.; Hoffman, Y.; Pomarède, D. (2014). The Laniakea supercluster of galaxies. *Nature*, 513 (7516), 71–73.

Zel'dovich, Ya. B. (1970). Gravitational instability: An approximate theory for large density perturbations. *A&A*, 5, 84–89.

Zúñiga, J.M.; Caretta, C.A.; González, A.P.; García-Manzanárez, E. (2024a). Testing an Entropy Estimator Related to the Dynamical State of Galaxy Clusters. *RMxAA*, 60, 141–164.

<https://doi.org/10.22201/ia.01851101p.2024.60.01.11>

Zúñiga, J.M.; Caretta, C.A.; Andernach, H.
(2024b). Nucleation regions in the Large-

Scale Structure I: A catalogue of cores in
nearby rich superclusters. *PASA*, 41, e078
(pp.27). <https://doi.org/10.1017/pasa.2024.49>