

Análisis de la orientación de los halos de materia oscura en la red cósmica

L.A. Pereyra¹, M.A. Sgró^{1,2} & M.E. Merchán^{1,2}

¹ Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, CONICET-UNC, Argentina

² Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

Contacto / luis.pereyra@unc.edu.ar

Resumen / En este trabajo, estudiamos el alineamiento entre la forma de los halos de materia oscura y su filamento más cercano. Para ello, empleamos una simulación cosmológica y la función de correlación anisotrópica, la cual es una herramienta estadística robusta. Esta permite estimar las funciones de correlación paralela y perpendicular a una dada dirección de interés. Observamos el conocido comportamiento de que halos de mayor masa muestran una señal de anisotropía mayor, y que dicha señal aumenta cuando aumenta la masa de los halos. Analizando la dependencia de dicha señal con la densidad por unidad de longitud de los filamentos, encontramos que los halos que habitan filamentos presentan una señal de anisotropía menor que la obtenida para la muestra TOTAL de halos, siendo más pequeña para halos habitando filamentos más densos.

Abstract / In this work, we study the alignment between the shape of dark matter halos and their nearest filament. For this purpose, we use a cosmological simulation and the anisotropic correlation function, which is a robust statistical tool. It allows us to estimate the correlation functions parallel and perpendicular to a given direction of interest. We observed the well-known behavior that higher-mass halos show a higher anisotropy signal and that this signal increases as the mass of the halos increases. Analyzing the dependence of this signal on the density per unit length of the filaments, we find that the halos inhabiting filaments show a lower anisotropy signal than that obtained for the TOTAL sample of halos, being smaller for halos inhabiting denser filaments.

Keywords / large-scale structure of universe — methods: numerical — methods: statistical

1. Introducción

La distribución de materia en gran escala del Universo, revela un complejo patrón anisotrópico de estructuras, compuesto por nodos (*halos*), filamentos, paredes y vacíos (*voids*) (Bond et al., 1996). Durante su evolución, el material bariónico es atraído hacia los centros de los halos de materia oscura, donde se enfría y colapsa formando estrellas y galaxias (White & Rees, 1978).

En este escenario, la forma de los halos es de particular interés. En general, se encuentra que los halos tienen formas preferentemente proladas, siendo esta mayor a medida que aumenta la masa del halo (Jing & Suto, 2002). Esta dependencia es esperada en el paradigma de formación jerárquico según el cual, la formación de estas estructuras se produce por la acreción difusa de materia y la fusión de halos pequeños, siendo los objetos más masivos formados en tiempos más recientes. Por otra parte, el ambiente en el cual se desarrollan los halos tiene fuerte influencia en el proceso de acreción. El campo de velocidad inducido por los pozos de potencial hace que el material contenido en los filamentos fluya hacia los nodos, definiendo así direcciones de acreción preferenciales (Paz et al., 2011; Pereyra et al., 2020). En consecuencia, el semi-eje mayor del tensor de forma de los halos de materia oscura estaría preferentemente alineado con la dirección del filamento más cercano (e.g. Aragon-Calvo & Yang, 2014; Ganeshiah Veena et al., 2018) y las estructuras circundantes (e.g. Libes-

kind et al., 2013).

En el presente trabajo estudiamos la alineación de los halos de materia oscura discriminados según el ambiente en el cual se hallan, en particular distinguiendo si se encuentran o no dentro de un filamento cosmológico. Para ello empleamos la función de correlación anisotrópica, la cual resulta conveniente ya que se puede estimar sin restricciones en las características del entorno.

2. Datos

Para el presente trabajo utilizamos una simulación numérica de N-cuerpos solo de materia oscura, la cual consiste en una caja cosmológica de $400 h^{-1} \text{Mpc}$ de lado con 1600^3 partículas. La misma fue realizada empleando el código GADGET-2 (Springel, 2005) adoptando parámetros cosmológicos compatibles con Planck Collaboration et al. (2018) ($\Omega_m = 0.27$, $\Omega_\Lambda = 0.73$, $h = 0.68$ y $\sigma_8 = 0.811$). Con estos parámetros la masa por partícula resultante es de $1.18 \times 10^9 h^{-1} M_\odot$.

Los halos de materia oscura fueron individualizados utilizando el algoritmo estándar *Friends-of-Friends* con una longitud de percolación equivalente a 0.17 veces la distancia media entre partículas. Solo consideramos halos con masas mayores a $M_{min} = 1.0 \times 10^{11} h^{-1} M_\odot$ correspondiendo a ≈ 85 partículas.

Los filamentos fueron identificados con el algoritmo descrito en Pereyra et al. (2020), basando en un *Minimal Spanning Tree* construido sobre los halos de materia

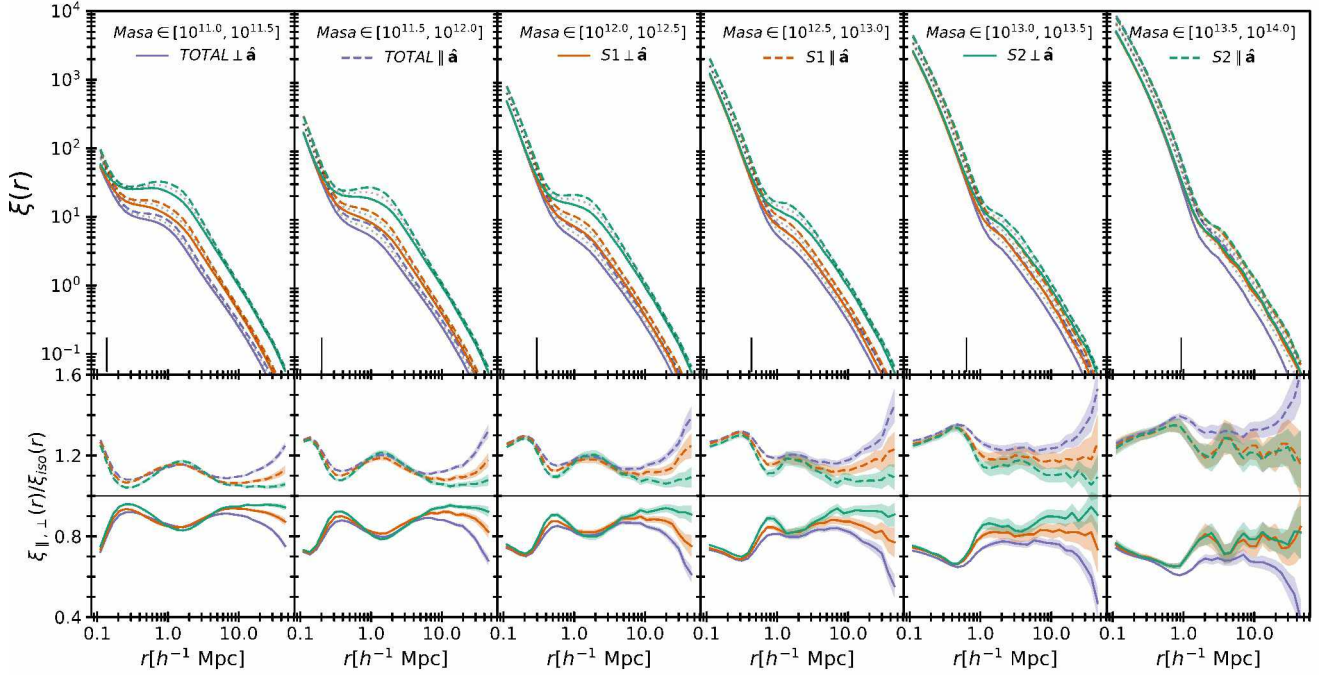


Figura 1: *Paneles superiores:* FCAs en la dirección paralela ξ_{\parallel} (línea de trazos) y perpendicular ξ_{\perp} (línea sólida) al semi-eje mayor. En líneas de puntos se muestra la función de correlación isotrópica ξ_{iso} . las líneas verticales negras indican el radio virial medio de cada muestra. Los diferentes colores corresponden a la muestra TOTAL de halos (azul), halos asociadas a la muestra S1 (naranja) y S2 (verde) para los seis rangos de masa indicados. *Paneles inferiores:* señal de anisotropía estimada como el cocientes entre $\xi_{\parallel}/\xi_{iso}$ y ξ_{\perp}/ξ_{iso} para cada una de las muestras.

oscura, el cual se recorre y poda con el fin de individualizar los filamentos. Cada uno de ellos consta de dos halos en sus extremos conectados por una lista de segmentos suavizados trazando su espina dorsal. Estos objetos son caracterizados por su masa por unidad de longitud μ , la cual es definida como el cociente entre su masa (computada como la materia encerrada en un tubo de radio $2 h^{-1} \text{Mpc}$ a lo largo de su espina dorsal) y su longitud.

Dado que estamos interesado en estudiar cómo el entorno de filamentos afecta a la alineación de los halos definimos 2 submuestras. Considerando que un volumen cilíndrico aleatorio de radio $2 h^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ y longitud $1 h^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ en la simulación tiene una masa por unidad de longitud media de $\bar{\mu} = 2.16 \times 10^{12} \text{Mpc}^{-1} M_{\odot}$, definimos la muestra de filamentos S1 como aquellos con $\mu > \bar{\mu}$ y la muestra S2 a aquellos con $\mu > 5 \times \bar{\mu}$. Posteriormente, se buscan y etiquetan todos los halos que se encuentran a una distancia menor de $2 h^{-1} \text{Mpc}$ de la espina dorsal de un filamento, excluyendo aquellos halos dentro del radio virial de los halos en los extremos de los filamento. Vale notar que los halos pertenecientes a la muestra S2 están incluidos en la muestra S1, y a su vez esta última incluida en la muestra TOTAL, correspondiente al conjunto de todos los halos de la simulación.

Los semi-ejes del elipsoide que describe la forma de un halo se obtienen calculando los autovalores y autovectores asociados al tensor de forma $I_{i,j}$ definido por:

$$I_{i,j} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_{n,i} x_{n,j} \quad (1)$$

siendo $x_{n,i}$ la i -ésima componente del vector posición de

la n -ésima partícula respecto al centro del halo, sumando sobre el total de partículas que pertenecen al mismo. Finalmente, para estudiar la dependencia con la masa de los halos, dividimos las muestras en seis rangos de masa entre 10^{11} y $10^{14} h^{-1} M_{\odot}$ iguales en escala logarítmica.

3. Resultados

La función de correlación anisotrópica (FCA) (Paz et al., 2008) es una herramienta estadística robusta para caracterizar los alineamientos tanto en simulaciones como en observaciones (Xia et al., 2017; López et al., 2019). En contraste con la función de correlación isotrópica, la FCA mide el exceso probabilidad de encontrar una partícula no solo en función de la distancia r sino también particularizando con una dirección de preferencia.

En nuestro caso, contaremos pares halo-partícula discriminando según se encuentren en un volumen cónico alrededor del semi-eje mayor o fuera de él. En el primer caso llamaremos FCA paralela (ξ_{\parallel}), mientras que en el segundo la denominaremos FCA perpendicular (ξ_{\perp}). El ángulo (θ_{th}) del volumen cónico es elegido de tal forma que ambos volúmenes sean iguales y complementarios. Esto puede lograrse estableciendo $\theta_{th} = 60^{\circ}$.

Los paneles superiores de la figura 1 muestran las componentes ξ_{\parallel} (líneas de trazos) y ξ_{\perp} (líneas sólidas) de la función de correlación anisotrópica para las muestras de halos S2 (naranja), S1 (verde) y TOTAL (azul), en seis rangos como se indica en cada panel. Para referencia las líneas punteadas representan la función de correlación isotrópica estimada para cada submuestra.

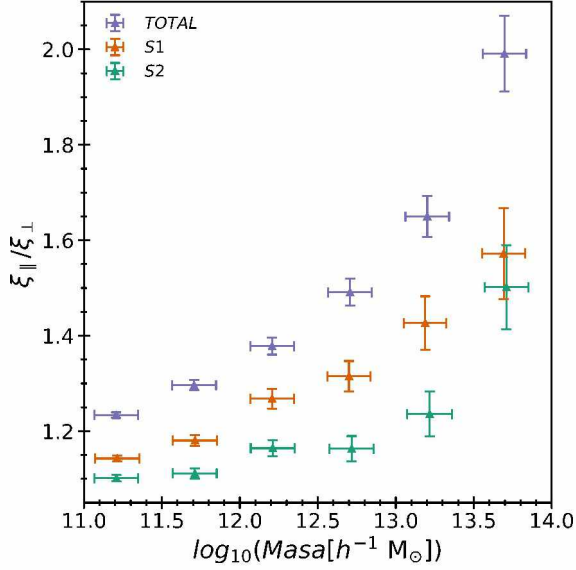


Figura 2: Cociente entre las FCAs paralelas y perpendiculares a la dirección del semi-eje mayor ($\xi_{\perp}/\xi_{\parallel}$), como función de la masa del halo. Los resultados se presentan en azul, naranja y verde para la muestra TOTAL, S1 y S2, respectivamente. Los cocientes son computados en la escala entre 5 y $20 h^{-1} \text{Mpc}$, los errores son estimados aplicando la técnica de *jackknife*, mientras que en la masa, la barra de error representa la dispersión de esta variable en el rango considerado.

Varios detalles merecen ser remarcados. Las correlaciones en las escalas correspondientes al término de 1-halo presentan igual amplitud para las tres muestras, aumentando con la masa. En escalas mayores, correspondientes al término de 2-halos, las FCAs de los halos pertenecientes a S1 y S2 muestran una amplitud mayor lo cual es un reflejo del hecho de que estos halos se encuentran en ambientes más densos. Asimismo, esto confirmaría una observación expuesta por algunos autores (Pujol et al., 2017), los cuales indican que el factor de sesgo (*bias*) tienen una fuerte dependencia con el entorno y no solo con la masa del halo en cuestión como se asume típicamente.

Los paneles inferiores de la figura 1, muestran los cocientes entre las funciones de correlación $\xi_{\parallel}(r)$ y $\xi_{\perp}(r)$ con la función de correlación isotrópica. Como puede observarse, ambas componentes (paralela y perpendicular) muestran una marcada desviación respecto a la función isotrópica independientemente del rango de masa. A distancias menores a $1 h^{-1} \text{Mpc}$, estos cocientes reflejan la forma interna de los halos de materia oscura, y se observa que para todos los rangos de masa las muestras coinciden dentro de un error de 3-sigma, sugiriendo que el entorno filamentoso no modifica fuertemente la estructura interna de los halos. A escalas mayores a $5 h^{-1} \text{Mpc}$, se observa que las señales de anisotropía para halos embebidos en entornos filamentosos (muestras S1 y S2) presentan una señal de anisotropía menor respecto a la muestra TOTAL. Esto apoyaría la idea de que halos en entornos más densos son sometidos a procesos no lineales más intensos que aquellos que se encuentran en entornos menos densos. Como consecuencia, su alineamiento se ve perturbado, perdiendo correlación con

respecto a la estructura en gran escala circundante.

Para cuantificar la señal de anisotropía, realizamos mediciones de las funciones de correlación anisotrópicas en un rango amplio de distancias ubicadas en el régimen de 2-halos. La figura 2 muestra los cocientes en las funciones de correlación ($\xi_{\parallel}/\xi_{\perp}$), estimadas en el rango de distancias entre 5 y $20 h^{-1} \text{Mpc}$, para los seis rangos de masa. La señal de anisotropía aumenta como función de la masa del halo independientemente del entorno en cual se encuentra inmerso. Sin embargo, la señal es más pequeña para las muestras de halos S1 y S2 que para la muestra TOTAL, siendo los halos en la muestra S2 los que tienen menor señal de anisotropía.

4. Conclusiones

Aplicando la función de correlación anisotrópica tomando como dirección de interés la del semi-eje mayor del tensor de forma de halos de materia oscura clasificados según su masa y el entorno en el cual se hallan encontramos que: - La amplitud de la función de correlación y la señal de anisotropía en escalas correspondientes al término de 1-halo no muestran ninguna dependencia con el entorno, i.e. la distribución de materia dentro de los halos no se ve afectada por el entorno. - En escalas más grandes tanto la amplitud como la señal de anisotropía si es afectada por el entorno. Mientras que la amplitud de las funciones de correlación para la muestra TOTAL muestran el comportamiento ya conocido de aumentar con la masa del halo, la amplitud para la muestra de halos en filamentos con densidad lineal grandes permanece casi constante. Esto apoyaría la idea de que el sesgo (*bias*) de los halos no depende únicamente de su masa. - Los halos que se encuentran en filamentos cosmológicos muestran una señal de anisotropía menor comparados con la muestra TOTAL de halos. Esto indicaría que la estructura filamentosa, lejos de incrementar la anisotropía alineando los halos con la estructura en gran escala, produciría una perturbación en las orientaciones de los halos haciendo más débil esta señal. Esto podría deberse a que los procesos no lineales tales como fusiones, encuentros cercanos y torques tidales secundarios son más intensos en el interior de estos objetos.

Referencias

- Aragon-Calvo M.A., Yang L.F., 2014, MNRAS, 440, L46
 Bond J.R., Kofman L., Pogosyan D., 1996, Nature, 380, 603
 Ganeshaiah Veena P., et al., 2018, MNRAS, 481, 414
 Jing Y.P., Suto Y., 2002, ApJ, 574, 538
 Libeskind N.L., et al., 2013, MNRAS, 428, 2489
 López P., Merchán M.E., Paz D.J., 2019, MNRAS, 485, 5244
 Paz D.J., Stasyszyn F., Padilla N.D., 2008, MNRAS, 389, 1127
 Paz D.J., et al., 2011, Mon. Not. R. Astron. Soc., 414, 2029
 Pereyra L.A., et al., 2020, MNRAS, 499, 4876
 Planck Collaboration, et al., 2018, arXiv e-prints, arXiv:1807.06209
 Pujol A., et al., 2017, A&A, 598, A103
 Springel V., 2005, MNRAS, 364, 1105
 White S.D.M., Rees M.J., 1978, MNRAS, 183, 341
 Xia Q., et al., 2017, ApJ, 848, 22