



Modulación de gran escala en procesos bariónicos en vacíos en expansión o contracción

A.M. Rodríguez Medrano^{1,3}, D.J. Paz^{1,2} & F. Stasyszyn^{1,2}

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

² Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

³ Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, UNC, Argentina

Contacto / arodriguez@unc.edu.ar

Resumen / Las grandes regiones subdensas del universo, denominadas vacíos cosmológicos, se caracterizan por presentar propiedades diferentes a la media del universo. En particular, podemos diferenciar las regiones de vacíos en dos poblaciones por su dinámica de expansión o contracción. Bajo esta dicotomía, los halos presentes en estas regiones y sus alrededores, se forman y evolucionan de diferentes maneras. En este trabajo, utilizando simulaciones de vacíos cosmológicos con modelos astrofísicos, caracterizamos los vacíos y su entorno a través del estudio de los bariones. Nuestros resultados indican una acreción más suave de materia a los halos presentes en vacíos y que aquellos halos presentes en las regiones externas de los vacíos sobredensos, sienten perturbaciones debido a halos masivos.

Abstract / Large sub-dense regions of the universe, called cosmic voids, are characterized for presenting properties different from the average of the Universe. In particular, we can differentiate the regions of voids in two populations due to their expansion or contraction dynamics. Under this dichotomy, the halos present inside and outside these regions, form and evolve in different ways. In this work, using simulations of cosmological voids with astrophysical models, we characterize the voids and their environment through the study of baryons. Our results indicate a smoother accretion of matter to the halos present in voids and those halos present in the outer regions of the overdense voids, feel disturbances due to massive halos.

Keywords / large-scale structure of universe — galaxies: formation — galaxies: halos

1. Motivación

Los vacíos cosmológicos (*cosmic voids*) pueden clasificarse dos tipos, según tengan un perfil de contraste de densidad integrado sobredenso (tipo S) o subdenso (tipo R) (Ceccarelli et al., 2013). Esta clasificación también implica características dinámicas, ya que los primeros tienen paredes que se encuentran en contracción, mientras que los segundos se encuentran en expansión. Las observaciones indican que las galaxias que habitan estos entornos, tienen características muy particulares, siendo típicamente azules, formadoras de estrellas y de baja masa (Rojas et al., 2004). En este trabajo estudiamos como impacta esta clasificación de vacíos en las características bariónicas de los ambientes y en los mecanismos de la formación de los halos.

2. Métodos

Sobre una simulación de materia oscura de un volumen cúbico comóvil de $500 h^{-1}\text{Mpc}$ de lado se identificaron vacíos esféricos con el algoritmo de Ruiz et al. (2015). Para la identificación se utiliza el contraste adimensional de densidad $\delta(r)$

$$\delta(r) = \frac{\rho(r) - \hat{\rho}}{\hat{\rho}} \quad (1)$$

donde ρ indica la densidad y $\hat{\rho}$ la densidad media del universo. Se calcula el contraste adimensional integrado

($\Delta(r)$) en esferas y el radio del vacío (r_{void}) se define como el radio donde $\Delta(r) = -0.9$.

Se seleccionaron 4 vacíos tipo R y 3 vacíos tipo S, todos de $\sim 10 h^{-1}\text{Mpc}$ de radio para ser resimulados. Las resimulaciones contienen partículas de gas, con los modelos de enfriamiento, formación estelar y *feedback* térmico de Springel & Hernquist (2003). También se realizó una simulación de un volumen cúbico comóvil de $125 h^{-1}\text{Mpc}$ (simulación de referencia) de lado con la misma resolución y las mismas implementaciones de física bariónica que las resimulaciones. Todas las simulaciones se realizaron con el código MUSIC (Hahn & Abel, 2011) para la generación de condiciones iniciales y el código GIZMO (Hopkins, 2015) para las integraciones. Los halos fueron identificados con el código ROCKSTAR (Behroozi et al., 2013). Las resimulaciones y simulación de referencia alcanzan una resolución de $m_{\text{DM}} = 9.3 \times 10^8 M_{\odot}$ y $m_{\text{gas}} = 1.8 \times 10^8 M_{\odot}$. Los parámetros cosmológicos utilizados corresponden a un universo ΛCDM , $\Omega_{\text{M}} = 0.276$, $\Omega_{\Lambda} = 0.274$, $\Omega_{\text{bar}} = 0.045$ y $h = 0.703$.

3. Resultados

La Figura 1 presenta el perfil del contraste de densidad diferencial medio de los vacíos tipo S y tipo R calculado mediante la técnica de *stacking* (apilamiento). Se puede apreciar que los interiores de los vacíos de ambos tipos

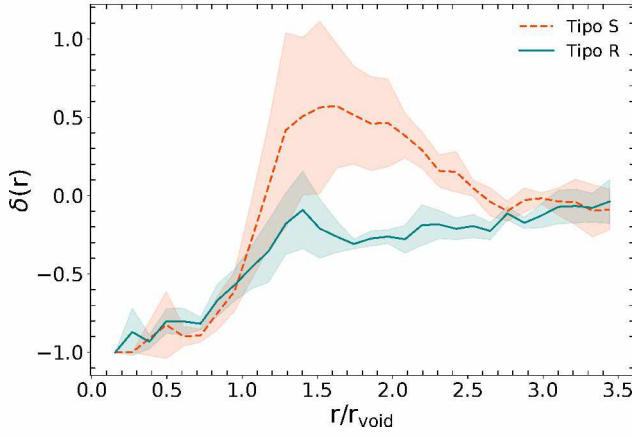


Figura 1: Perfil de densidad diferencial medio de los vacíos utilizados. La curva naranja rayada es el correspondiente a los vacíos tipo S, la azul continua corresponde a los vacíos tipo R. La región sombreada representa la incertidumbre de la media calculada mediante la técnica de apilamiento.

son similares. Mas allá del radio del vacío, los vacíos tipo S alcanzan densidades mayores a la media del universo. Ambos vacíos, alcanzan la densidad media del universo cerca de $3r_{\text{void}}$

Para caracterizar la componente bariónica separamos el gas en base a su densidad y temperatura en cuatro fases:

- Difuso: gas a baja densidad y baja temperatura. Es el gas que se encuentra en un proceso de colapso adiabático.
- WHIM: (*warm-hot intergalactic medium*) gas a baja densidad y alta temperatura, calentado mediante shocks relacionados con la acreción de gas a los halos.
- Condensado: gas denso y a baja temperatura, se encuentra en los pozos de potencial de los halos y es combustible para la formación estelar.
- Caliente: gas denso y a alta temperatura, es calentado a través del *feedback* de la formación estelar.

Los límites en densidad y temperatura utilizados para esta clasificación son estándar en la literatura (Martizzi et al., 2019; Davé et al., 2010; Huang et al., 2019). Se utilizó una temperatura de 10^5 K y la densidad definida por Kitayama & Suto (1996) por el contraste adimensional de densidad crítico δ_c donde el gas se encuentra virializado.

La Figura 2 presenta los perfiles de fracciones relativas de gas y se construyen contando las partículas de gas en cada una de las 4 fases que se encuentran en diferentes intervalos radiales y calculando la fracción que representan en ese intervalo. Esta fracción dividida la fracción cosmológica de ese gas es la *fracción relativa*. Los perfiles están constituidos por el valor medio y su error, mediante la técnica de *stacking*. En las regiones internas hay una sobreabundancia de gas difuso en ambos tipos de vacíos, llegando a ser ~ 2.5 veces la fracción de gas difuso de todo el universo. Esta sobreabundancia se compensa con poco gas condensado y de las fases caliente y WHIM. Esta señal indica poco procesamiento del gas y se debe a que los ambientes subdensos evolucio-

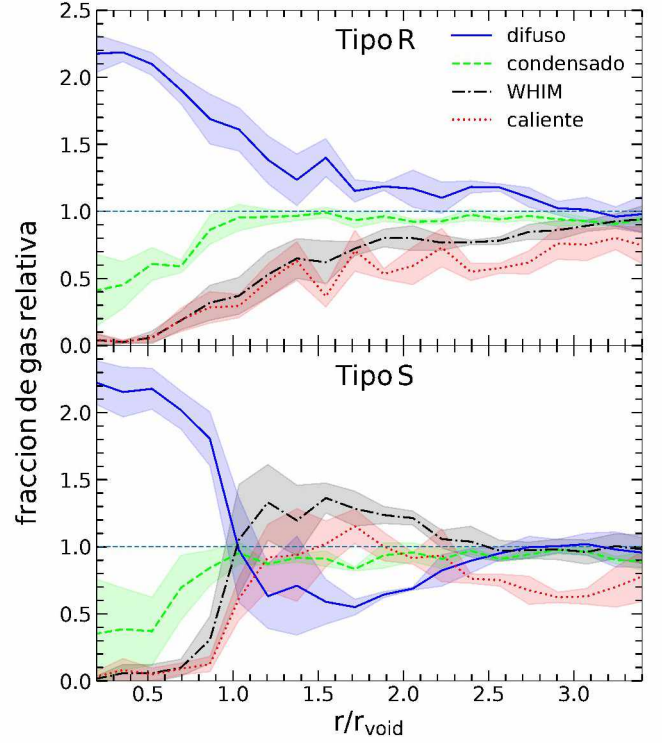


Figura 2: Perfiles medios de fracciones de cada fase de gas en cáscaras centradas en los vacíos relativo a la fracción cosmológica de cada fase de gas. *Panel superior:* perfil para los vacíos tipo R. *Panel inferior:* perfil para los vacíos tipo S.

nan de una manera más lenta, tardando más tiempo en formar halos y estrellas. Las regiones externas comprendidas entre $1 - 3r_{\text{void}}$ son muy diferentes según el vacío sea tipo R o S. Los tipo S tienen una sobreabundancia de las fases más calientes y poco gas difuso, respecto a la media, lo cual indica que el gas a sido muy procesado en estas regiones. Esto se debe a que existe una sobreabundancia de estrellas que mediante el *feedback* calientan el gas produciendo los excesos de las fases calientes y WHIM. Por otro lado, los tipo R en su región externa, al seguir siendo subdensos, siguen teniendo las sobreabundancias de gas difuso y poco de las fases más calientes y de estrellas. Ambos tipos de vacíos alcanzan las fracciones cosmológicas en $\sim 3r_{\text{void}}$, esto indica que el entorno de los vacíos influye mucho más allá del radio donde son identificados.

La Figura 3 presenta las funciones de masa de los vacíos, las regiones cercanas ($1 - 3r_{\text{void}}$) y de la simulación de referencia. Estas funciones señalan como los vacíos carecen de halos de más allá de $\sim 10^{13} M_{\odot}$. La zona sombreada indica la región de halos estudiada en este trabajo, estos son aquellos de masas de $1.0 - 1.5 \times 10^{11} M_{\odot}$.

Sobre los halos señalados en la Figura 3 calculamos sus espacios de fase. Estos se construyen separando las partículas en intervalos de velocidad radial y distancia al centro de los halos. Utilizando la velocidad circular y radio virial del halo como normalización. Para estudiar el flujo de partículas al centro de los halos, se resta la componente de velocidades radiales positivas de

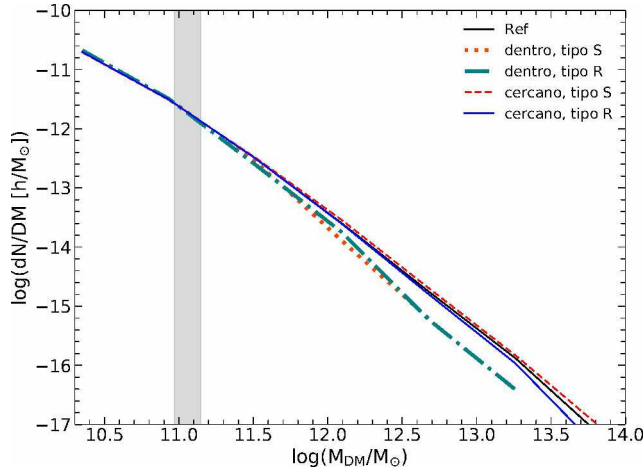


Figura 3: Funciones de masa de los vacíos en sus diferentes regiones. La curva verde rayada-punteada corresponde al interior de los vacíos R, la punteada naranja al interior de los vacíos S. La curva roja rayada corresponde al exterior de los vacíos S y la azul continua al exterior de los vacíos R. La curva negra corresponde a la simulación de referencia. La zona coloreada en gris es el rango de masa de los halos analizados en este trabajo.

los espacios de fases, a la componente de velocidades radiales negativas. Se obtiene así el exceso de partículas con velocidades radiales negativas que están siendo atraídas por el potencial del halo. Este proceso se conoce como *infall*. Esto se presenta en la Figura 4. En los paneles inferiores, principalmente el inferior izquierdo, se aprecian visiblemente dos componentes de *infall*, una en la región $\approx 2 - 4 r/r_{\text{vir}}$ con bajas velocidades radiales ($v_r/v_{\text{circ}} > -1$), y otra componente en la región $r/r_{\text{vir}} \gtrsim 6$ con altas velocidades radiales ($v_r/v_{\text{circ}} < -1$). Esta segunda componente esta principalmente asociada a la atracción gravitatoria que halos mayores ejercen sobre los halos donde se centran los diagramas.

La Figura 4 indica que el flujo de materia oscura difiere en función del entorno. El flujo hacia halos en los vacíos S (panel superior izquierdo) y R (panel superior derecho), está principalmente asociado al *infall* a bajas velocidades radiales. Esto es así ya que la segunda componente del *infall* se debe a estructuras más masivas, de las que los vacíos carecen. A su vez la señal parece indicar que el *infall* es más fuerte en los vacíos tipo R y que los halos en vacíos S tienen comparativamente mayor *infall* a distancias mayores.

Al comparar la región cercana al vacío S (panel inferior izquierdo) y la región cercana a los vacíos tipo R (panel inferior derecho) se aprecia mediante la intensidad del mapa de colores que los primeros tienen un exceso de *infall* a distancias grandes, mientras que en la región cercana a los vacíos tipo R es más fuerte el *infall* a distancias cercanas. Esto es así debido al exceso de estructuras masivas que se encuentran en las regiones externas a los vacíos tipo S. Las regiones externas a los vacíos tipo R, siguen siendo subdensas en las regiones analizadas (Figura 1) por lo que el *infall* asociado a los halos más masivos no es tan fuerte como en el caso de las regiones externas a vacíos tipo S.

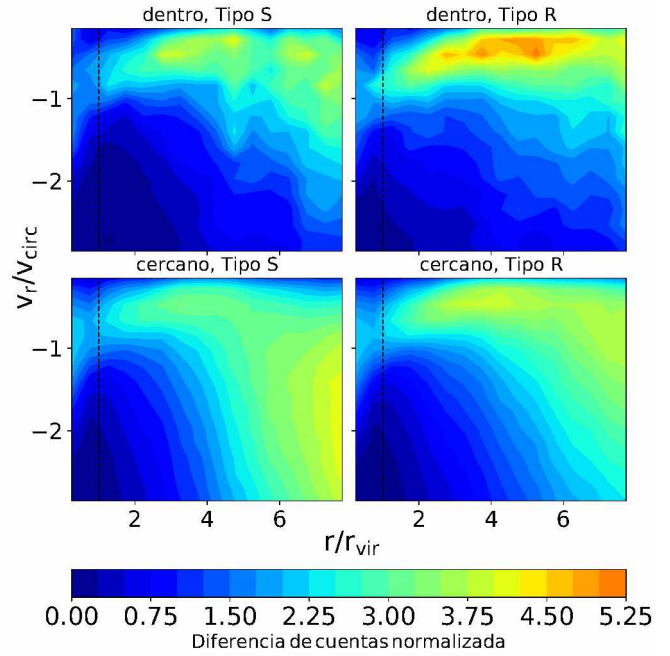


Figura 4: Diagramas de fase de la materia oscura de los halos en diferentes ambientes. *Panel superior izquierdo*: halos en el interior de los vacíos tipo S. *Panel superior derecho*: halos en los vacíos tipo R. *Panel inferior izquierdo*: halos en la zona cercana ($1-3r_{\text{void}}$) a los vacíos tipo S. *Panel inferior derecho*: halos en la zona cercana a los vacíos tipo R. La línea negra punteada señala el radio virial. La escala de colores indica el número de partículas medio de cada celda de la grilla.

4. Conclusiones

En este trabajo se presentó una caracterización bariónica de los interiores de los vacíos y sus regiones cercanas, clasificando a estos dinámicamente, como vacíos tipo S o tipo R. La principal diferencia se encuentra en las regiones cercanas a estos, donde los vacíos tipo S son sobredensos y poseen abundante gas caliente y WHIM, producto de las estructuras masivas que allí yacen.

En cuanto a la formación de halos, se encontró que en las regiones cercanas a los vacíos tipo S, los halos en el rango de masas estudiado, se encuentran siendo atraídos por halos mayores, cayendo a grupos y sistemas. Este comportamiento es menos frecuente en las regiones cercanas a los vacíos tipo R, y mucho menos en los interiores de los vacíos.

Referencias

- Behroozi P.S., Wechsler R.H., Wu H.Y., 2013, ApJ, 762, 109
- Ceccarelli L., et al., 2013, MNRAS, 434, 1435
- Davé R., et al., 2010, MNRAS, 408, 2051
- Hahn O., Abel T., 2011, MNRAS, 415, 2101
- Hopkins P.F., 2015, MNRAS, 450, 53
- Huang S., et al., 2019, MNRAS, 484, 2021
- Kitayama T., Suto Y., 1996, ApJ, 469, 480
- Martizzi D., et al., 2019, MNRAS, 486, 3766
- Rojas R.R., et al., 2004, ApJ, 617, 50
- Ruiz A.N., et al., 2015, MNRAS, 448, 1471
- Springel V., Hernquist L., 2003, MNRAS, 339, 289