



Estructura de los supercúmulos de galaxias mediante el Efecto Sunyaev-Zel'dovich

Nelson Falcón

Universidad de Carabobo. FACYT. Dpto. de Física.

nelsonfalconv@gmail.com

Resumen

La interacción Compton inversa (Efecto Sunyaev-Zel'dovich) de los electrones en el halo de los supercúmulos de galaxias con fotones de la Radiación Cósmica de fondo (CMB) constituye una evidencia de la materia oscura bariónica. Esta materia oscura, compuesta de gas ionizado puede distribuirse geométricamente como filamentos o como capas concéntricas. Empleando técnicas de interferometría se puede caracterizar la distribución espacial y densidad electrónica en las asociaciones de cúmulos de Galaxias. Se presenta un modelo de los agregados de materia para los Supercúmulos de Hércules y Corona Boreal que permite estimar las fluctuaciones CMB debidas al efecto Sunyaev-Zel'dovich, y su generalización a otros cúmulos de Galaxias con emisión difusa en rayos X para dilucidar la distribución espacial de la materia oscura bariónica.

Palabras clave: supercúmulos de galaxias, materia oscura, Efecto Sunyaev-Zel'dovich.

Structure of the Super Clusters of Galaxies through Sunyaev-Zel'dovich Effect

Abstract

The inverse Compton interaction (Sunyaev-Zel'dovich) of the electrons in the halo of superclusters of galaxies with photons of the cosmic background radiation (CMB) is an evidence of baryonic dark matter. This dark matter consisting of ionized gas can be distributed geometrically as filaments or as concentric layers. Using radio interferometry techniques can characterize the spatial distribution and electron density in the clusters of galaxies. A model of aggregates of matter to the superclusters of Hercules and Corona Borealis to estimate the CMB fluctuations due to the Sunyaev-Zel'dovich effect and its generalization to other clusters of galaxies with X-ray diffuse emission to elucidate the distribution Space baryonic dark matter.

Key words: superclusters of galaxies, dark matter, Sunyaev-Zel'dovich effect.

Introducción

La determinación de la densidad de materia en el Universo es fundamental para establecer el modelo cosmológico apropiado del origen y la evolución del cosmos, sin embargo los resultados recientes (Peebles, 1993; Ross, 1997) parecen indicar que la mayor parte de la materia en el Universo es opaca (materia oscura bariónica) e incluso transparente a toda la radiación electromagnética (materia oscura no bariónica). Por otra parte la materia observable en forma de estrellas y galaxias constituye sólo un 10 % de la materia bariónica existente en el Universo (Peacock, 1999) una posibilidad es que gran parte de la materia oscura bariónica se encuentre en forma de gas diluido en/y alrededor de los cúmulos y supercúmulos de galaxias, en densidades extremadamente bajas (del orden de 10^{-3} partículas por centímetro cúbico). A tales densidades la materia resulta esencialmente traslúcida a la radiación e inobservable aún con telescopios colosales que podrían ponerse en el espacio en la próxima centuria. Sin embargo los volúmenes de estas superestructuras en el universo, son tales, que su contribución a la densidad crítica podría ser importante, aún más que la materia luminosa en forma de estrellas y galaxias.

La cuantía de materia diluida en forma de plasma en cada supercúmulo de galaxias dependiera de la geometría asumida para la distribución del gas intracumular e intrasupercumular. Los modelos de formación de estructura a gran escala suponen una

estructura filamentosa, del gas que equivale a suponer una simetría cilíndrica para la distribución del gas (Peebles y Rastra 2003) mientras que los modelos de fragmentación de nubes protogalácticas invocan una simetría esférica (Padmanabhan 1995). La interpretación de las densidades de materia, inferidas de las medidas interferométricas y de rayos X, dependerá de la simetría supuesta para la distribución del gas supercumular. En este trabajo se muestra como depende las anisotropías de la radiación cósmica de fondo (debidas al efecto Sunyaev-Zel'dovich) con la geometría asumida para la distribución del gas, y se realizan las estimaciones teóricas para los supercúmulos de galaxias Corona Boreal y Hércules, a fin de interpretar las futuras observaciones de éstos por el interferómetro VSA.

El gas contenido en los cúmulos de galaxias y en los supercúmulos interactuaría ("débilmente") con los fotones del fondo cósmico de microondas (CMB) a través del efecto Sunyaev-Zel'dovich y dejaría su impronta como un decremento en la temperatura del CMB a la frecuencia de 33 GHz con la cual opera el Interferómetro de 14 antenas del Observatorio del Teide, único en su tipo. Este instrumento conocido como Very Small Array (VSA) posee un amplio campo que le permite escrutar la radiación cósmica de fondo en campos tan extensos del cielo de 2° de radio (Falcon y Genova-Santos, 2002). En la sección 2 presentamos la discusión del Efecto Sunyaev-Zel'dovich y elaboraremos modelos cuantitativos para estimar dicho efecto en superestructuras (sección 3)

cuyos resultados y discusión presentamos en la última sección (sección 4).

Efecto Sunyaev-Zel'dovich Térmico

El decremento en temperatura debido al efecto Compton inverso del plasma electrónico con los fotones del fondo cósmico de microondas, está dado por la relación (Sunyaev-Zel'dovich, 1970):

$$\frac{\Delta T(x)}{T_{CMB}} = y_c [x \coth(x/2) - 4] \equiv y_c g(x) \quad (1)$$

donde x es la frecuencia adimensional en términos de la temperatura (T_{CMB}) del fondo cósmico de microondas ($h/k_B T_{CMB}$) y (y_c) es el parámetro de Comptonización, que depende solamente de la temperatura del plasma (T_e) y densidad electrónica. Ambas contribuciones son integradas a lo largo de la línea de visión (dl):

$$y_c \equiv \frac{k_B}{m_e c^2} \int T_e \sigma_T n_e(ct) d(ct) \equiv \tau \frac{k_B T_e}{m_e c^2} \quad (2)$$

Las observaciones en rayos X aseguran que T_e es constante (Irwin & Bregman 2000), por lo que y_c puede ser expresada en función de la profundidad óptica (τ) del medio:

$$\tau = \sigma_T n_0 \int \left[1 + \left(\frac{r}{R_c} \right)^2 \right]^{-3\beta/2} dl \quad (3)$$

La densidad del gas es aproximada por una distribución tipo “-model” (Mohr et al 1999):

$$n_e(r) = n_0 \left[1 + \left(\frac{r}{R_c} \right)^2 \right]^{-3\beta/2} \quad (4)$$

donde n_0 es la densidad central del número de electrones y R_c es el radio del núcleo del supercúmulo de galaxias. Asumiendo, como es usual en cúmulos de galaxias, índice de decremento central 0, que el parámetro de Comptonización es:

$$y_c \approx \frac{\sigma_T}{m_e c^2} [k_B T_e] [n_0 R_c] \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

En el régimen de Rayleigh-Jeans $x \ll 1$ ($=33\text{GHz}$) y el factor de frecuencia $g(x) = -1.94 - 2$, con lo cual el decremento SZ de la temperatura central es:

$$\Delta T_{SZ}^{(RJ)} \approx -34.48 \langle \mu K \rangle \left[\frac{k_B T_e}{keV} \right] \left[\frac{R_c}{Mpc} \right] \left[\frac{n_0}{10^{-3} cm^{-3}} \right] \quad (6)$$

Modelo De Estructuras A Gran Escala

En supercúmulos de galaxias, donde las dimensiones características de los objetos supera los 50 Megapasec (Roos, M. 1997) el gas diluido disperso entre los cúmulos de galaxias, y formando filamentos entre las galaxias componentes de cada cúmulo, debería causar también anisotropías secundarias en la radiación cósmica de fondo por Efecto Sunyaev-Zel'dovich. La cuantía de la distorsión dependerá del parámetro de comptonización y por ende de la geometría asumida para la distribución del gas caliente en la superestructura.

Bajo la hipótesis de que el gas caliente difuso en los supercúmulos de galaxias es el responsable de la emisión difusa en rayos X observada (Mason & Meyers; 2000), podemos caracterizar la densidad y la temperatura del gas por los valores reportados por las medidas en rayos X de tales estructuras. Así, si se supone en primera aproximación que el gas diluido es isotérmico (Irwin & Bregman 2000) el flujo en rayos x en función de la frecuencia es:

$$J = 4\pi \int j_\nu d\nu = 4\pi \int_0^\infty \left(\frac{2^7 \pi}{27} \right)^{1/2} \frac{z^2 e^6 n_e n_i}{m^{3/2} c^2 \sqrt{k_B T}} \text{Exp} \left(\frac{h\nu^2}{k_B T} \right) d\nu \quad (7)$$

donde Z es el número atómico (se asume gas de Hidrogeno), m y e son respectivamente la masa y la carga del electrón.

Empleando la condición de equilibrio que iguala la cardinalidad entre iones y electrones, justificado por el hecho de que el medio interestelar es eléctricamente neutro ($n_i \sim n_e$), podemos integrar el flujo para todo el espacio a fin de expresar la luminosidad en rayos X (L_x) en términos de los observables como (Peebles, 1993):

$$L_x = \int_V J d^3x \approx 1.4 \cdot 10^{35} \langle W \rangle \left[\frac{T_x}{keV} \right]^{1/2} \left[\frac{R}{kpc} \right]^3 \left[\frac{n_e}{cm^{-3}} \right]^2 \quad (8)$$

Combinando las ecuaciones (6) y (8) obtenemos:

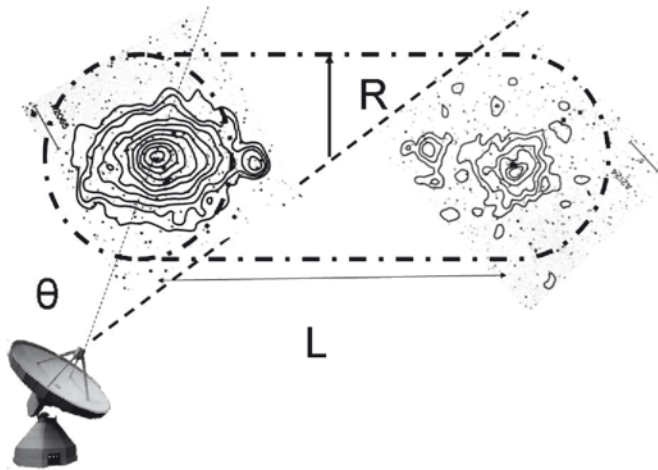
$$\Delta T \approx -2.914 \langle \mu K \rangle \left[\frac{k_B T_e}{keV} \right]^{3/4} \left[\frac{R_c}{10 Mpc} \right]^{1/2} \left[\frac{L_x}{10^{37} W} \right]^{1/2} \quad (9)$$

Esta relación es esencialmente la relación de Birkinshaw (1999) para superestructuras, salvo un factor de dos veces menor causada por la estimación aproximada del espesor óptico realizada por Birkinshaw. De cualquier modo es deseable especificar una geometría más realista para la distribución de materia en los supercúmulos para determinar el decremento SZ de las anisotropías de la radiación cósmica de fondo.



Modelo del Filamento Cilíndrico. Una posible geometría para la distribución de gas intercúmulos de galaxias es mostrada en la figura 1, donde la distancia entre dos cúmulos de galaxias es L y R_c es la extensión radial del gas, entendida como aquella donde la densidad puntual decae a la mitad de la densidad media, es la extensión angular del cúmulo.

Figura 1: Estructura filiforme (Cilíndrica) si la materia oscura entre cúmulos forma filamentos, el decremento SZ debe coincidir con la relación (14) para R igual al radio del cúmulo.



Cabe esperar que la densidad electrónica se incremente linealmente en los centros de los cúmulos a lo largo de la línea que los une y que decrezca como r^{-1} en las otras dimensiones, de allí que:

$$n'_e(r) = n'_0 \left[1 + \left(\frac{r}{R_c} \right)^2 \right]^{-1} \left[\frac{2z}{L} - 1 \right]^2 \quad (10)$$

También la densidad del número de electrones se relaciona con la fracción de la masa del gas intercúmulo (f_{ICM}), el peso molecular promedio y la masa total M , como:

$$\int_V n' dV \equiv N = \frac{M f_{ICM}}{\mu m_p} \quad (11)$$

Usando esta distribución del gas obtenemos para la profundidad óptica :

$$\tau = \frac{\sigma_T n'_0 R_c}{\cos \theta} \left[\frac{\pi}{2} - \frac{2R_c}{L} \tan \theta \ln 4 + \left(\frac{2R_c}{L} \tan \theta \right)^2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \right] \quad (12)$$

Donde

$$n'_0 \approx \frac{M f_{ICM}}{R_c^2 \mu m_p} \frac{1.38}{L} \quad (13)$$

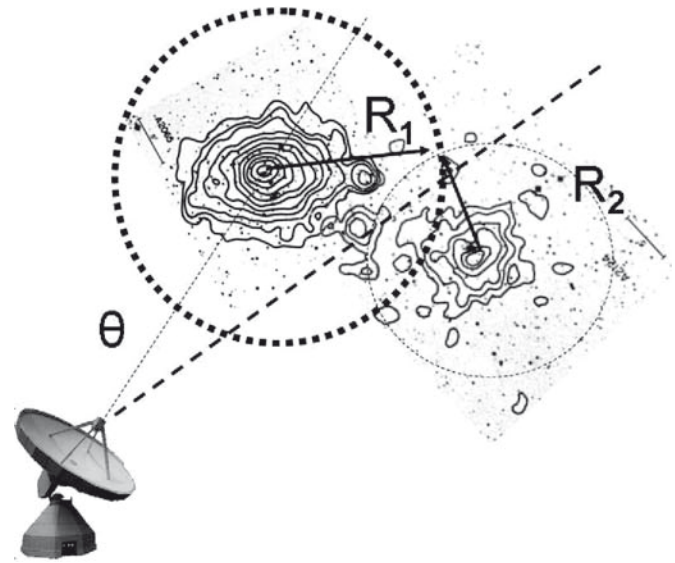
El decremento SZ esperado en intensidad, en terminos observables resulta así:

$$\Delta S_{SZ}^{(RJ)} \approx -52,86 \langle mJy / beam \rangle \left[\frac{k_B T_e}{keV} \right] \left[\frac{R_c}{L} \right] \left[\frac{R_c}{Mpc} \right] \left[\frac{n_0}{10^{-3} cm^{-3}} \right] \quad (14)$$

Modelo de Capas esféricas

La acumulación del plasma (gas caliente) intercúmulo puede asociarse a los cúmulos de galaxias en capas esféricas concéntricas, en cuyo caso el parametro de Comptonización a lo largo de la línea de visión cambia respecto a las estimaciones basadas en el modelo de filamentos cilíndricos, vease figura 2.

Figura 2: Estructura de Cebolla (Esférica) si la materia oscura entre cúmulos forma capas, el decremento SZ debe coincidir con la relación (17) si R_1 y R_2 son los radios de los cúmulos respectivos.



Si R es el radio del cúmulo i -esimo y θ_i es la extensión angular respecto al centro del campo, la profundidad optica estará dada por:

$$\tau = \sum_i \tau_i = \sum_{i \text{ Donde } i} 2\sigma_T n_{0i} R_i [1 + a_i^2]^{-1/2} \arctg \sqrt{\frac{1 - a_i^2}{1 + a_i^2}} \quad (15)$$

$$a_i \equiv (D_i / R_i) \sin \theta_i \quad (16)$$

En el caso especial de cúmulos equidistantes y de radios comparables, el decremento SZ en temperatura adquiere la forma:

$$\Delta T_{SZ}^{(RJ)} \approx -34,48 \langle \mu K \rangle [1 + a^2]^{-1/2} \arctg \sqrt{\frac{1 - a^2}{1 + a^2}} \left[\frac{k_B T_e}{keV} \right] \left\{ \left[\frac{R_1}{Mpc} \right] \left[\frac{n_{01}}{10^{-3} cm^{-3}} \right] + \left[\frac{R_2}{Mpc} \right] \left[\frac{n_{02}}{10^{-3} cm^{-3}} \right] \right\} \quad (17)$$

Resultados y Discusion

Las relaciones (6), (9), (14) y (17) se emplean para calcular el efecto SZ en cúmulos y supercúmulos de galaxias observables con el VSA. Obsérvese que las relaciones precedentes permiten estimar la densidad electrónica, y con ello la densidad bariónica de la superestructura. Para ello se debe combinar la data experimental proveniente de la radioastronomía (decremento de temperatura a través del -efecto Seldov-Zel'dovich) y la temperatura electrónica proveniente de los datos de emisión difusa de rayos X.

La Tabla 1 Resume las estimaciones de los decrementos SZ en temperatura e intensidad (penúltima y última columna respectivamente) para los cúmulos de galaxias observados con el VSA del Observatorio del Teide (Lankaster et al 2005).

La tabla 2 resumen las estimaciones de los decrementos SZ para campos seleccionados. La primera columna contiene el número de supercúmulo (Einasto, M. et al 1994), su nombre y las coordenadas de acceso recta y declinación (época 2000). La segunda y tercera columna, los decrementos máximos a la distancia media intercúmular en milikelvin y en intensidad radiométrica (miliJansky) respectivamente. La columna 4 indica la extensión angular, el resto de las columnas los valores típicos reportados para los cúmulos indicados en el catálogo de Abell y la última columna el máximo decremento SZ esperado para el centro del cúmulo.

Las estimaciones precedentes, para la medición del efecto Sunyaev- Zel'dovich en superestructuras, indican por un lado la factibilidad de su detección con técnicas interferométricas por encima del nivel de ruido que podría

tener la instrumentación existente en el Observatorio del Teide y en otros radiotelescopios similares. Además de la validez de la aproximación de Rayleigh-Jean para la estimación de los decrementos centrales.

Por otro lado los cálculos resumidos en la tablas 1 y 2, permitirán establecer la distribución (geometría) del gas caliente a gran escala, y con ello dilucidar los mecanismos de formación de las galaxias y los cúmulos de galaxias, como las estructuras encontradas ya en el supercúmulo de Corona Boreal (Genova-Santos et al, 2008). La importancia del trabajo teórico recide pues en la estimación, por vez primera, de la cuantía del efecto SZ y su vinculación con los modelos geométricos de distribución del gas caliente en el Universo a Gran Escala, permitiendo dilucidar la estructura a gran escala del gas de electrones contenido en los supercúmulos de galaxias a través de la medición del efecto Sunyaev-Zeldovich. Si bien es cierto que la afección y la no isothermalidad pudieran no cumplirse en muchos cúmulos de galaxias, y en consecuencia las temperaturas del plasma, inferidas de las medidas de rayos x, estarían sobrestimadas en un modelo tipo “-model” para algunos cúmulos de galaxias en particular, estas correcciones afectarían por igual a ambas distribuciones del gas (ecuaciones 9 y 17) toda vez que el decremento de temperatura debido al Efecto Sunyaev-Zel'dovich es lineal en la temperatura en ambos casos.

Es importante destacar que estas mediciones resultan así independientes de cuan distante se encuentre el supercúmulo y por lo tanto, de cuan antiguas, sea la estructura. Esta es una ventaja de la técnica que la hace muy superior a la observación telescópica ordinaria (en

Tabla 1: Decrementos SZ de cúmulos observable con VSA.

Objeto AR δ (2000)	T_e keV	n_{e0} 10^{-3} cm^{-3}	R_{core} Mpc	$\Delta T_{\text{SZ}}^{(\text{RJ})}$ μK	ΔS_{SZ} μJy
A399 0257.9+1300	5.8 5.8	3.24	.45 .5	291 324	238.6 265.7
A401 0258.9+1334	8 7.8	8.01	.246 .26	543.5 560.1	445.7 459.3
A478 0413.3+1028	8.4 7.8	28.9	.098 .135	781.2 1049.3	640.6 860.4
A1795 1349.0+2635	5.8 7.8	11.29	.078 .21	176.1 637.6	144.4 522.8
A2142 1558.3+2713	9.7 9.4	15.03	.154 .216	815.3 1085.8	668.6 890.4
A2244 17024+34025	7.1 7.1	17.73	.126	547 205	448.5



Tabla 2: Estimación del Efecto Sunyaev-Zel'dovich para los Supercúmulos.

Supercúmulo y campo α, δ Centro del Campo	ΔT_{sz} [μ K]	ΔT_{sz} [mJy]	θ [grados]	Cúmulo	Te keV	L_X $10^{37}W$	Rc [Mpc]	ΔT_{sz} [mK]
160 Hercules 1 16 12 00 +16 18 00	-57.6	23.74	.556	A2147 A2152	4.4 2.1	4.2 .38	.701 .367	-112.9 -98.6
160 Hercules 2 16 06 00 +17 05 52	-165.5	68.2	1.300	A2151 A2152	3.5 2.1	1.46 .38	.227 .367	-30 -29.1
160 Hercules 3 15 00 00 +16 12 00	-56.5	23.29	.415	A2040 A2052	2.5 3.4	.64 3.65	.618 .892	-44.3 -98.6
160 Hercules 4 15 12 13.9 +06 36 05	-122.4	50.44	.0819	A2052 A2055	3.4 5.8	3.65 2.19	.892 .507	-98.6 -103.5
160 Hercules 5 16 28 23.5 +40 12 56	-143.1	58.97	1.383	A2197 A2199	1.6 4.7	.16 6.3	.545 .713	-9.26 -32.5
158 Corona Borealis 1 15 17 00 + 28 18 00	-141.0	58.1	.551	A2065 A2056	8.4 --	2.76 --	.0722 --	-32.6 --
158 Corona Borealis 2 15 30 24.7 +28 28 14	-195.6	80.6	.818	A2079 A2089	3.2 --	.82 --	.737 --	-6.7 --

cualquier región del espectro electromagnético) que está fuertemente limitada por la distancia, haciendo impracticable la observación de gas difuso mas allá del Grupo Local aún con los Telescopios Espaciales. Aún es pronto para realizar medidas determinantes sobre estos aspectos, pues cada campo (área de observación) requiere entre 70 y 90 noches útiles de observación con el Interferómetro; habida cuenta que se espera medir fluctuaciones en el orden de los microkelvin.

Agradecimiento

Al Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) por su hospitalidad y cofinanciamiento del presente trabajo.

Referencias

Birkinshaw, M. (1999) Phys. Rep. 310, 97.
David, L.P et al. (1993) ApJ 412;478-488.
Einasto, M. et al (1994) MNRAS 269, 301.
Falcon, N. ; Genova-Santos, R (2002, noviembre) Searching for Baryonic Dark Matter in Superclusters of Galaxies. Presentado en XIV Winter School of Astrophysics: Dark Matter and Dark Energy in the Universe. Puerto de la Cruz , Tenerife, España.
Genova-Santos, R. et al (2008) MNRAS 391, 1127-1.136

Irwin, J. ; Bregman, J. (2000, Julio) Radial Temperature Profiles of 11 Clusters of Galaxies Observed with BeppoSAX. Presentado en IAP 2000 meeting, Paris, France.
Lankaster, K; Genova-Santos, R.; Falcon, N. Grainge, K. (2005) MNRAS 359, 16-30.
Mason, B.M.; Meyers, S.T. (2000) ApJ540, 614-633
Mohr, J.; Mathiesen, B.; Evrard, A.(1999) ApJ. 517, 627.
Padmanabhan (1995) Structure formation in the Universe. Cambridge U. Press.
Peacock, J.(1999) Cosmological Physics, Cambridge U. Press.
Peebles, P.J. ; Rastra, B. (2003) RvMP 75, 559.
Peebles, P.J. (1993) Principles of Physical Cosmology . Princenton Univ. Press
Reiprich, T. ; Böhringer, H. (2002) ApJ 567,716-740
Roos, M. (1997) Introduction to Cosmology, Wiley & Sons, England.
Sunyaev, E.V.; Zel'dovich, Y.B. (1970) Ap.& SS, 7, 3.
White, D.A. et al (1997) MNRAS 292, 219
Zhang, T.J. ; Wu, H.P. (2000) ApJ 545,141-144