

Cúmulos de galaxias y la constante de Hubble*

*Nelson Falcón***

*Instituto de Astrofísica de Canarias, avenida Vía Láctea, La Laguna, Tenerife, España.
Departamento de Física, FACYT, Universidad de Carabobo, Apartado 129,
avenida Bolívar Norte, Valencia, estado Carabobo, Venezuela.*

Recibido: 30-11-05 Aceptado: 10-04-06

Resumen

La tasa de expansión del Universo, a gran escala, está determinada por el valor de la constante de Hubble (H_0). Diversos métodos se han empleado en su determinación: anisotropías de la Radiación Cómica de Fondo, observación de supernovas y galaxias activas a alto *redshift*. En este trabajo se emplea el método de Grainge *et ál.* (3), que permite la estimación de la constante de Hubble a través del efecto Sunyaev-Zel'dovich. Para ello se emplean resultados del interferómetro VSA (Observatorio del Teide) y los del satélite ROSAT de rayos X. Los resultados obtenidos, $h \cong 0,78$, son consistentes con los reportados para otros *clusters* de galaxias (Mason *et ál.*, 2001) y ligeramente diferentes al valor de $h = 0,71$ obtenido por otros métodos. Se discuten las fuentes de las posibles discrepancias en términos de las hipótesis de isothermalidad y esfericidad de los *clusters*, y del efecto cinético Sunyaev- Zel'dovich.

Palabras claves: cosmología: constante de Hubble, cúmulos de galaxias, efecto Sunyaev-Zel'dovich.

Clusters of galaxies and the Hubble constant

Abstract

The expansion rate, at height scale, of the Universe, is given for the value of the Hubble constant (H_0). Several methods have used by determinations of the Hubble constant: CMB anisotropy's, Supernovae observation and AGN at height redshift. In this work, we used the Grainge *et al.* (3) method by estimated of the Hubble constant thought of the Sunyaev-Zel'dovich effect and the result of the VSA interferometer (Teide Observatory) and the X-ray data by ROSAT. We obtain, $h \cong 0,78$, in accord with other report by cluster of galaxies (Mason *et al.*, 2001) as higher than of the standard value $h = 0,71$ obtain by other method. We discussed the systematic fount of error and possible discrepant by assumptions of the spheroid and isothermal in cluster and the Sunyaev- Zel'dovich Kinetic effect.

Key words: cosmology: Hubble constant, clusters of galaxies, Sunyaev-Zel'dovich effect.

* Trabajo presentado en el V Congreso de la Sociedad Venezolana de Física, Universidad del Zulia. Nucleo Punto Fijo - Edo. Falcón, Venezuela, Noviembre 2005.

** Autor para la correspondencia. E-mail: nelsonfalcon@gmail.com.

Introducción

Las medidas interferométricas del efecto Sunyaev-Zel'dovich (SZE) en cúmulos de galaxias pueden ser usadas para determinar la constante de Hubble (H_0). La constante de Hubble puede ser razonablemente estimada a través de la observación de supernovas lejanas del tipo Ia (1) (en la nomenclatura astronómica, SNe Ia). Sin embargo, la estimación de la constante de Hubble por medio de SZE y medidas de rayos en cúmulos de galaxias no requiere de calibradores de distancia empírica y puede ser usada a cualquier escala de distancia cósmica (vale decir, es válida para todo *redshift*). Véase Geinge *et ál.* (2). Este método se ha empleado en varios cúmulos de galaxias. No obstante, los resultados no son definitivos porque hasta ahora la detección del decremento SZ solo es posible en algunos pocos cúmulos de galaxias y/o con gran incerteza en la determinación veraz en la magnitud del efecto Sunyaev-Zel'dovich (2, 3). Se empleará este método para estimar la constante de Hubble a partir de las recientes medidas del efecto SZ efectuadas en el interferómetro VSA para diversos cúmulos de galaxias (4). En este trabajo definimos, como es usual, $H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, siendo h un coeficiente en el rango (0, 1).

Efecto Sunyaev-Zel'dovich

La interacción Compton inversa entre el plasma electrónico del halo de los cúmulos de galaxias con los fotones de la Radiación Cósmica de Fondo (Cosmic Microwave Background) se denomina efecto Sunyaev-Zel'dovich (5) (SZ) y se consideran anisotropías de segundo orden en el espectro de potencias del CMB. Dependiendo de la frecuencia de observación, este efecto se manifiesta como un decremento o un incremento de intensidad y/o temperatura respecto al *background* del CMB y su magnitud por (5, 6):

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

Donde χ es la frecuencia adimensional en términos de la temperatura ($T_{\text{CMB}} = 2,728 \pm 0,004 \text{ K}$ [7]) del fondo cósmico de microondas $x \equiv \frac{h\nu}{k_B T_{\text{CMB}}}$ y (y_c) es el parámetro

de comptonización, que depende solamente de la temperatura del plasma (T_e) y la densidad electrónica. Ambas contribuciones son integradas a lo largo de la línea de visión (dlcdt) por lo que el efecto SZ resulta, así, independiente de la distancia

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

Es necesario, para valuar la integral precedente, especificar la distribución del gas en los cúmulos de galaxias. En este trabajo empleamos el modelo estándar o β -*model* (8), donde la densidad está escrita en términos de la densidad del número de electrones (n_0), el índice β , y el radio del núcleo R_c como:

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

Introduciendo [3] en [2], obtenemos:

$$\gamma_c = \frac{2k_B \sigma_T}{m_e c^2} T_e n_0 R_c \int_0^\infty [1 + \rho^2]^{-3\beta_x/2} d\rho \quad [4]$$

A frecuencias menores que 218 GHz, la intensidad de la radiación CMB disminuye con respecto al valor medio del CMB sin *scattering*, y el efecto SZ se manifiesta como un fuerte decremento en el brillo hacia el centro del cúmulo de galaxias. A frecuencias de operación de interferómetro muy inferiores a 218 GHz, $\chi \ll 1$ y $g(\chi) \approx -2$ (régimen de Rayleigh-Jeans), y el decremento SZ de la temperatura central, usando [1] y [4], es:

$$\Delta T_{\text{SZ}} = -4261 (\mu\text{K}) I_0 \left[\frac{k_B T_c}{\text{keV}} \right] \left[\frac{n_0}{10^{-3} \text{ cm}^{-3}} \right] \left[\frac{R_c}{\text{Mpc}} \right] \quad [5]$$

En cúmulos de galaxias, donde las dimensiones características de los objetos es

del orden de los Megapasec, el gas diluido disperso entre las galaxias 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 cúmulos de galaxias es el responsable de la emisión difusa en rayos X observada (6, 9), 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 una primera aproximación, que el gas diluido es isotérmico (10), el flujo en rayos X en función de la frecuencia es:

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

donde z es el número atómico, mientras que m y e son, respectivamente, la masa y la carga del electrón.

Como 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 (11):

$$L_x = \int_V J d^3x \cong 1.410^{35} \langle W \rangle \left[\frac{T_x}{\text{keV}} \right]^{1/2} \left[\frac{R}{\text{kpc}} \right]^3 \left[\frac{n}{\text{cm}^{-3}} \right]^2 \quad [7]$$

Es claro que esta relación permite estimar la densidad del número de partículas n_0 , toda vez que se conoce la luminosidad en rayos X del cúmulo en particular, y la distribución del perfil de esta [3] en un β -model (12).

Por otra parte, de los perfiles de luminosidad en rayos X de los cúmulos de galaxias se ajustan las curvas de emisividad para obtener los parámetros n_0 , R_0 y β , y se mide la temperatura electrónica efectiva.

Resultados y discusión

Obviamente, si $R_c \sim h^{-1}$ y $n_0 \sim h^{1/2}$ en la data usual de rayos X, entonces podemos emplear la ecuación [5] para determinar el coeficiente de la constante de Hubble (h):

$$h = \left[\frac{\Delta T_{SZ}^x}{\Delta T_0^{Obs}} \right]^2 \quad [8]$$

donde el subíndice x denota que la densidad central es calculada por medio de los datos

Tabla 1
Cúmulo: datos y medidas.

Cúmulo	Z	θ_0 2 arcmin	T_c keV [2]	n_{e0} [2] $10^{-3} h^{1/2} \text{cm}^{-3}$	R_{α} $h^{-1} \text{Mpc}$ [2]	β_x	$\Delta T_{SZ}^{(x)}$ ($h^{-1/2} \mu\text{K}$)	ΔT_{SZ}^{Obs} (μK) 4
A399	0,0715	4,33	7,0±0,4	3,23 ^{+0,14} _{-0,19}	0,248±.026	0,742	-326±64	-17 ⁺³⁹ ₋₄₀
A401	0,0748	2,26	8,0±0,4	7,9 ⁺⁵ _{-1,2}	0,135±.024	0,636	-604±206	-519 ⁺⁷³ ₋₇₃
A0478	0,0881	1,0	8,4 ^{+0,8} _{-1,4}	27,81 ^{+16,2} _{-3,9}	0,0675±.01	0,638	-1140±440	-1158 ⁺¹¹⁴ ₋₁₁₅
A1795	0,0622	2,17	7,8±1	10,7 ^{+0,61} _{-1,8}	0,109±.014	0,698	-571±212	-853 ⁺⁷⁴ ₋₇₃
A2142	0,0899	1,6	9,7±1,1	14,95 ^{+0,9} _{-1,07}	0,113±.008	0,635	-1160±250	-821 ⁺⁹⁰ ₋₁₀₀
A2244	0,0970	0,82	7,1 ⁺⁵ _{-2,2}	17,30 ^{+1,95} _{-2,65}	0,062±.01	0,580	-614±430	-56±122
Coma	0,0232	9,32	9,1±0,1	4,52±0,04	0,183±.002	0,67	-498±33	-5611±42

Donde Z denota el coeficiente de corrimiento hacia el rojo; θ_0 es la distancia angular en minutos de arco; T_e y n_{e0} son la temperatura y la densidad electrónica del plasma, respectivamente; R_α es el radio del núcleo en unidades de megaparsec; β_x es un parámetro de ajuste del modelo, y $\Delta T_{SZ}^{(x)}$ es la medida de la disminución de temperatura debido al efecto Sunyaev-Zel'dovich.

Tabla 2.
Constante de Hubble normalizada (h) para distintas cosmologías.

	$\Omega_M=1,0$ $\Omega_\Lambda=0,0$	$\Omega_M=0,3$ $\Omega_\Lambda=0,0$	$\Omega_M=0,3$ $\Omega_\Lambda=0,7$
A401	$1,25^{+1,06}_{-1,21}$	$1,29^{+1,09}_{-1,24}$	$1,35^{+1,14}_{-1,30}$
A478	$0,89^{+1,51}_{-0,87}$	$0,92^{+1,86}_{-0,90}$	$0,97^{+1,65}_{-1,30}$
A1795	$0,42^{+0,29}_{-0,39}$	$0,43^{+0,30}_{-0,39}$	$0,45^{+0,31}_{-0,41}$
A2142	$1,83^{+1,28}_{-1,23}$	$1,89^{+1,33}_{-1,27}$	$2,00^{+1,40}_{-1,34}$
Coma	$0,93^{+0,27}_{-0,28}$	$0,93^{+0,28}_{-0,28}$	$0,95^{+0,28}_{-0,28}$
Muestra	$0,78^{+0,27}_{-0,21}$	$0,79^{+0,20}_{-0,21}$	$0,81^{+0,20}_{-0,22}$

Donde Ω_M es el parámetro de densidad de materia y Ω_Λ , el parámetro de densidad equivalente a la constante cosmológica de Einstein.

de rayos X y el estandarte *Obs* refiere que el decremento de temperatura SZ es medido en el límite de Rayleigh-Jeans. Hemos realizado la estimación para tres modelos cosmológicos diferentes: SCDM ($\Omega_M=1,0$ $\Omega_\Lambda=0,0$), CDM ($\Omega_M=0,3$ $\Omega_\Lambda=0,0$) y Λ CDM ($\Omega_M=1,0$ $\Omega_\Lambda=0,0$). Los valores obtenidos para cada una de estas tres cosmologías, así como las medidas ponderadas de todas, se muestran en la tabla 2, para los cúmulos de galaxias donde la detección del efecto SZ es segura, vale decir, que la señal es superior a tres veces el valor rms del mapa o región de detección (señal mayor a 3σ). Para detalles de las observaciones interferométricas con VSA véase (4).

Los errores solo incluyen las incertidumbres estadísticas. Otros errores sistemáticos se deben a la no esfericidad de los cúmulos ($\pm 12\%$), a las desviaciones de la isothermalidad ($\pm 10\%$) y, finalmente, hasta un 20%, al despreciar las posibles subestructuras de los cúmulos. Adicionalmente existe un error de $\pm 4,6\%$ causado al despreciar el efecto térmico SZ de los cúmulos.

Manson *et ál.* (2) reportan, respectivamente, en A399, A401, A478, A2142 y Coma; $1,02^{+1,16}_{-0,53}$, $0,48^{+0,28}_{-0,16}$, $0,61^{+0,33}_{-0,20}$, $0,79^{+0,34}_{-0,24}$ y $0,62^{+0,49}_{-0,24}$ para cosmología SCDM. El promedio sobre sus siete cúmulos es $0,64^{+0,14}_{-0,11}$, lo cual está de acuerdo con no-

sotros, aunque tenemos desviaciones altas en los cúmulos individuales. Así, Manson *et ál.* (2) obtienen $h=0,57^{+0,23}_{-0,16}$ en A1413, mientras que $h=0,69^{+0,21}_{-0,16}$ en el cúmulo lejano CL0016_16, en ambos casos para un modelo SCD. Además, nuestro resultado está en buen acuerdo con medidas obtenidas utilizando otros métodos: $h=0,71^{+0,04}_{-0,03}$, utilizando los resultados de WMAP, y $h=0,72\pm 0,08$, a través del *Hubble Key Project* (3). O bien, el valor de $h=0,73^{+0,09}_{-0,07}$, a partir de los últimos resultados de VSA.

Conclusiones

La mayor fuente potencial de error sistemático es la hipótesis de isothermalidad. En general, el perfil de temperatura puede decrecer con el radio; en consecuencia, la fracción de masa bariónica puede crecer con el radio. Por ejemplo, en un modelo no isotérmico de emisión de rayos X del gas (13), que incluye los cúmulos A478, A1795, A2142, se ha puntualizado que la fracción bariónica puede ser mayor que 20%. La asunción del perfil de densidad esférico podría ser otra fuente de error. Piffaretti *et ál.* (14) encontraron que en los perfiles de rayos X a R_{500} la diferencia entre formas esféricas y elongadas es generalmente menor que 4%. Nótese que, en particular, los cúmulos A478 y A1795 están incluidos en el estudio de Piffaretti. Un estimado más realista para la constante de

Hubble, $H_0 = 75,18 \text{ Km/s Mpc}^{-1}$ ($\Omega_m = 0,3; \Omega_\Lambda = 0,7$), se ha obtenido para el cúmulo A2142, en buen acuerdo con otras determinaciones recientes (15).

Agradecimientos

Al doctor José Fermín y a la doctora Luz Marina Soto por sus comentarios y sugerencias para la realización del manuscrito. Al CDCH-UC por el financiamiento parcial del presente trabajo.

Referencias bibliográficas

1. PERLMUTTER S., ALDERING G., GOLDHABER G., KNOP R., NUGENT P., CASTRO P., DEUSTUA S., FABBRO S., GOOBAR A., GROOM, D.E. *ApJ* 517, 565, 1999.
2. MASON B., MYERS S., READHEAD C.S. *ApJ* 555, L11, 2001.
3. GRAINGE K., JONES M., POOLEY G., SAUNDERS R., EDGE A., GRAINGER W.F., KNEISSL R. *MNRAS* 329, 890, 2002.
4. LANCASTER K., GENOVA-SANTOS R., FALCÓN N., GRAINGE K., GUTIÉRREZ C., KNEISSL R., MARSHALL P., POOLEY G., REBOLO R., RUBIÑO-MARTIN J. *MNRAS* 356, 16-30, 2005.
5. SUNYAEV R., ZEL'DOVICH Y.A. *Ap. & SS* 7, 3, 1970.
6. BIRKINSHAW, M. *Phys. Rep.* 310, 97, 1999.
7. FIXSEN D., CHENG E., GALES J., MATHER J., SHAFER R., WRIGHT E. *ApJ* 473, 576, 1996.
8. CAVALIERE A., FUSCO-FEMIANO R. *A&A* 49, 137, 1976.
9. MASON J., MEYERS R. *ApJ* 540, 614-633, 2000.
10. IRWIN J., BREGMAN J. "Radial temperature profiles of 11 clusters of galaxies observed with BeppoSAX". In: *IAP meeting*. Paris (France), 76 pp., 2000.
11. PEEBLES P.J. *Principles of physical cosmology*. Princenton U. Press (USA), p. 782, 1993.
12. REIPRICH T., BÖHRINGER H. *ApJ* 567, 716-740, 2002.
13. HENRIKSEN M., WHITE III R. *ApJ* 465, 515, 1996.
14. PIFFARETTI R., JETZER P.H., SCHINDLER S. *A&A* 398, 41, 2003.
15. SPERGEL D.N., VERDE L., PEIRIS H.V., KOMATSU E., NOLTA M.R., BENNETT C., HALPERN M., HINSHAW G., JAROSIK N., KOGUTA. *ApJ* S.148, 175-186, 2003.