



**INAOE**

# **Evolución de Cúmulos de galaxias empleando el efecto Sunyaev-Zel'dovich**

por

**David Omar Sánchez Arguelles**  
**Ing. IPN**

Tesis que es sometida como requisito parcial para obtener  
el grado de

**Maestro en Ciencias EN LA ESPECIALIDAD DE  
ASTROFÍSICA**

en el

**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica**  
Agosto 2009  
Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

**Dr. David H. Hughes**  
Investigador Titular INAOE

©INAOE 2009

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y  
distribuir copias en su totalidad o en partes de esta tesis





# Resumen

El presente trabajo contiene una breve descripción de las características del efecto Sunyaev-Zel'dovich y su aplicación para recuperar las propiedades de cúmulos de galaxias empleando observaciones en la región milimétrica del espectro electromagnético. Se describen las observaciones realizadas con la cámara AzTEC instalada en el telescopio ASTE a 1.1mm sobre cúmulos de galaxias en el universo cercano. A su vez, se describen las fuentes de contaminación y confusión que afectan este tipo de observaciones.

La comprensión de estos efectos permitirá diseñar y realizar (como proyecto a realizar en el Doctorado en Ciencias con especialidad en Astrofísica) un estudio de los cúmulos de galaxias que serán identificados mediante el efecto Sunyaev-Zel'dovich por los telescopios ACT, SPT y Planck. Las observaciones que se realizarán con la cámara AzTEC, una vez instalada en el Gran Telescopio Milimétrico, permitirán realizar fuertes restricciones a los modelos de evolución de la estructura a gran escala.



# Abstract

This work contains a brief description of the features of the Sunyaev-Zel'dovich effect and its applications for recovering the properties of galaxy clusters through millimeter wavelength observations. Observations taken at 1.1mm with the AzTEC camera towards galaxy clusters in the near universe are described, as well as the contamination and confusion sources in this type of observations.

The understanding of galaxy cluster properties will allow the design and running (as a PhD. project) of a study about galaxy clusters that will be identified through the Sunyaev-Zel'dovich effect by the telescopes ACT, SPT and Planck. Once installed on the Large Millimeter Telescope, the AzTEC camera will take observations to improve the constraints on large scale structure evolution models.



# Agradecimientos

A mi familia, que siempre me ha apoyado sin importar el camino que siga, brindándome del amor y cariño que me ha ayudado a conseguir mis metas. A mi asesor, Dr. David H. Hughes, por la oportunidad de pertenecer a este proyecto, por las largas pláticas en las que aprendí tanto, por su confianza y paciencia. A los miembros de mi jurado de examen, Dra. Itziar Aretxaga, Dr. Daniel Rosa González y Dr. Miguel Chávez Dagostino por los comentarios que ayudaron a mejorar este trabajo. A mis compañeros y amigos, por hacer más especial el tiempo que he pasado en el instituto. Al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica por el apoyo brindado en la realización de la Maestría. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la Beca otorgada para la realización de la Maestría.





# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Cúmulos de galaxias y la estructura a gran escala . . . . .	1
1.1.1. Detección de cúmulos de galaxias . . . . .	2
1.1.2. Observaciones en longitud de onda milimétrica . . . . .	3
1.1.3. Cúmulos de galaxias y la cosmología . . . . .	6
<b>2. El Efecto Sunyaev-Zel'dovich</b>	<b>11</b>
2.1. Física del Efecto Sunyaev-Zel'dovich . . . . .	11
2.1.1. Dispersión Compton Inversa . . . . .	11
2.1.2. Aproximación de Kompaneets . . . . .	13
2.1.3. SZE térmico . . . . .	13
2.1.4. SZE cinemático . . . . .	14
2.2. Describiendo cúmulos de galaxias con el SZE . . . . .	17
2.2.1. Descripción del medio intracúmulo . . . . .	17
2.3. Cosmología con cúmulos de galaxias y el SZE . . . . .	19
2.3.1. La constante de Hubble $H_0$ . . . . .	19
2.3.2. Fracción bariónica . . . . .	21
2.3.3. Relaciones de escala . . . . .	23
2.3.4. Espectro de potencia . . . . .	24
2.3.5. Ecuación de estado de la energía oscura . . . . .	25
<b>3. Diseño experimental</b>	<b>27</b>
3.1. Objetivo . . . . .	27
3.2. Estado de las observaciones del SZE . . . . .	27
3.2.1. Observaciones en radio . . . . .	28
3.2.2. Experimentos en milimétrico . . . . .	28
3.3. Observaciones con AzTEC . . . . .	31
3.3.1. AzTEC Cluster Evolution Survey (ACES) . . . . .	31

3.3.2.	Muestra de cúmulos . . . . .	31
3.4.	Fuentes de contaminación y confusión . . . . .	32
3.4.1.	Fuentes de radio . . . . .	32
3.4.2.	Galaxias submilimétricas . . . . .	34
3.4.3.	Fluctuaciones primordiales del CMB . . . . .	36
3.5.	Consideraciones de diseño . . . . .	36
<b>4.</b>	<b>Trabajo Futuro</b>	<b>45</b>
4.1.	Metas a corto plazo . . . . .	45
4.1.1.	Reducción de observaciones tomadas con AzTEC@ASTE . . . . .	45
4.1.2.	Reducción orientada a la emisión extendida . . . . .	46
4.1.3.	Restricciones computacionales . . . . .	47
4.1.4.	Reducción de datos multifrecuencia . . . . .	49
4.1.5.	Colaboración con BOLOCAM . . . . .	49
4.2.	Metas a mediano plazo . . . . .	50
4.2.1.	Análisis de las observaciones . . . . .	50
4.2.2.	Colaboración con ACT . . . . .	51
4.2.3.	GTM primera luz . . . . .	51
4.3.	Metas a largo plazo . . . . .	53
4.3.1.	Ciencia con los instrumentos de segunda generación en el GTM . . . . .	53
4.3.2.	Evolución de cúmulos de galaxias . . . . .	54
4.4.	Plan de trabajo . . . . .	56

# Prefacio

Los cúmulos de galaxias son las estructuras ligadas gravitacionalmente más masivas que se conocen en el universo, con masas entre  $10^{13}$  y  $10^{14}M_{\odot}$ . Su proceso de formación está definido por la interacción gravitacional y la presencia de fluctuaciones del campo de densidad primordial; por este motivo se convierte en trazadores cosmológicos. Recuperar las propiedades de los cúmulos de galaxias y su evolución con el tiempo cósmico permite establecer fuertes restricciones a los modelos cosmológicos.

Los cúmulos de galaxias fueron descubiertos mediante identificar sobredensidades de galaxias en observaciones realizadas en el óptico. Más tarde se descubrió el medio intracúmulo por medio de observaciones en rayos-x. Las observaciones en óptico y rayos-X de cúmulos de galaxias están limitadas a encontrar solo los cúmulos más masivos a distancias mayores.

Las observaciones del efecto Sunyaev-Zel'dovich no están limitadas en luminosidad, si no en masa. Por esta razón, permite detectar cúmulos de galaxias sin importar la distancia al mismo. Debido a que el contraste entre modelos cosmológicos proporcional a la distancia, el efecto Sunyaev-Zel'dovich es una herramienta poderosa en estudios cosmológicos.

El valor de esta herramienta se ve disminuido por los retos a superar en su detección como la sensibilidad necesaria y las fuentes de confusión y contaminación. Estas fuentes introducen errores al determinar la propiedad principal de los cúmulos de galaxias: su masa. El análisis de las observaciones que se proponen en este trabajo permitirán disminuir los efectos inducidos por estas fuentes, estableciendo restricciones más confiables a la evolución de la estructura a gran escala.



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Cúmulos de galaxias y la estructura a gran escala

Hacia finales de los setentas las observaciones demostraron que la mayoría de la materia luminosa en el universo se presenta arreglada en forma estructurada en lugar de hallarse distribuida en forma aleatoria.

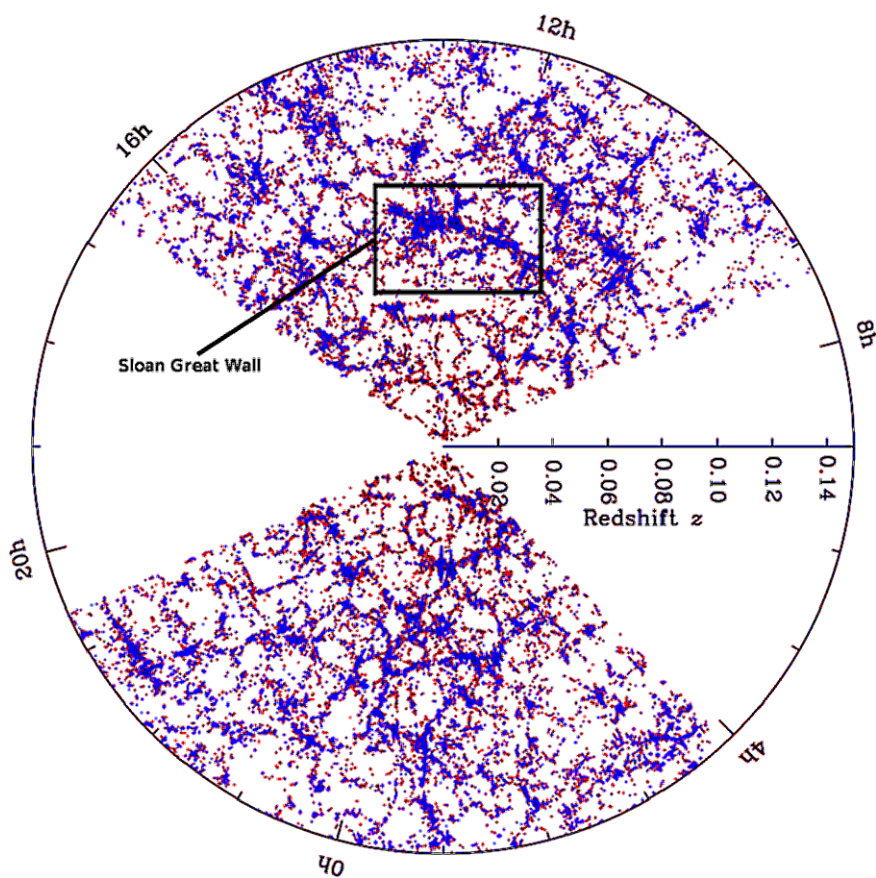
Las grandes búsquedas o *surveys* de galaxias con información de *redshift*, como el *Two degree Field Galaxy Redshift Survey* (2dFGRS) [43] o el *Sloan Digital Sky Survey* [45]) encontraron que estas se concentran en grandes estructuras filamentosarias, paredes y cúmulos, en contraste con regiones con pocas o ninguna galaxias, conocidas como huecos o *voids*; esta estructura se denomina red cósmica o *cosmic web* (véase Figura 1.1).

Los cúmulos de galaxias destacan en la red cósmica, aparecen en las intersecciones (o nodos) de la estructura filamentaria, son las estructuras más masivas ligadas gravitacionalmente, en equilibrio quasi-virial. Contribuyen hasta en un 4 % de la masa del Universo [61] debido a que cada cúmulo contiene entre  $10^{13} - 10^{15} M_{\odot}$ . Son regiones de alta densidad, en su interior se concentran cientos o miles de galaxias en un radio de apenas algunos megaparsecs.

El origen de los cúmulos de galaxias proviene del crecimiento y colapso de las pequeñas fluctuaciones en el campo de densidad primordial del universo. La evolución de estas fluctuaciones está determinada por la competencia entre la fuerza de gravedad y la expansión del universo.

La presencia de regiones con una mayor densidad de materia en el universo temprano genera pozos de potencial gravitacional más profundos. Por otra parte, una mayor densidad de energía oscura limita la cantidad de material que puede ser capturada dentro de los pozos de potencial.

Este proceso de competencia deja su huella en la estructura a gran escala del universo, en particular, en la dinámica, el tamaño, masa total y época de formación de los cúmulos de galaxias.



**Figura 1.1:** Reconstrucción de la estructura a gran escala realizada por el SDSS hasta  $z = 0.15$  [44]. Se aprecia claramente la estructura filamentaria en la distribución de galaxias, así como las regiones de los huecos. La densidad de galaxias esta codificada mediante color (rojo: menor densidad, azul: mayor densidad), se aprecia la Gran Pared de Sloan en la rebanada superior, estructura localizada a  $z = 0.073$  (señalada por rectángulo negro) la más grande de estas estructuras (419 Mpc de largo en unidades comóviles) que se conoce hoy en día.

### 1.1.1. Detección de cúmulos de galaxias

Los cúmulos de galaxias fueron descubiertos en el intervalo óptico del espectro electromagnético localizando zonas con una mayor densidad superficial de galaxias, el ejercicio realizado por Abell utilizando las placas de Monte Palomar [1] derivó en una muestra completa de cúmulos de galaxias hasta  $z \simeq 0.1$ . La introducción de los detectores CCD, las búsquedas (*surveys*) automatizados y novedosas técnicas de identificación [16] (mediante fotometría en varias bandas principalmente) permitió incrementar rápidamente el número de cúmulos conocidos, para el primer semestre de 2009 la base de datos SIMBAD [64] reporta 23774 cúmulos, mientras que la base de datos extragaláctica NASA/IPAC [20] reporta 55218, siendo el más lejano CIGJ2143-4423 a  $z = 2.38$  [42].

La alta resolución espacial disponible en las observaciones en el óptico e infrarrojo permiten estudios detallados de las galaxias que componen a los cúmulos de galaxias cercanos, de esta forma se puede obtener un estimado de la masa dentro del pozo de potencial del cúmulo utilizando la dispersión de velocidades de estas galaxias y el teorema del virial. Otro camino para encontrar la masa del cúmulo es emplear el efecto de lente gravitacional sobre galaxias en el fondo y generar reconstrucciones del potencial.

El medio intracúmulo (ICM por sus siglas en inglés) está compuesto por gas casi completamente ionizado a una temperatura de  $10^7 - 10^8\text{K}$  y densidades típicas de  $n_e = 10^2\text{m}^{-3}$  debido a estas condiciones los cúmulos emiten en rayos-X por medio de radiación por bremsstrahlung observándose como fuentes extendidas. El ICM es un medio enriquecido, prueba de ello son las líneas del FeXXVI, Fe XXV a 6.7 keV así como líneas de C, N, O y otros elementos pesados [51].

El ICM se modela como un fluido en equilibrio hidrostático, por lo que la masa total del cúmulo puede encontrarse realizando observaciones en rayos-x (recuperando el perfil de densidad y de temperatura del ICM) y resolver la ecuación de equilibrio hidrostático:

$$M(r) = -\frac{rk_B T(r)}{\mu m_p G} \left[ \frac{d \ln p(r)}{d \ln r} + \frac{d \ln T(r)}{d \ln r} \right] \quad (1.1)$$

donde  $M(r)$  es la masa contenida dentro del cúmulo dentro del radio  $r$ ,  $\mu$  es el peso molecular medio,  $m_p$  es la masa del protón,  $T(r)$  es el perfil de temperatura,  $p(r)$  es el perfil densidad y  $k_B$  es la constante de Boltzmann.

### 1.1.2. Observaciones en longitud de onda milimétrica

Las observaciones en la región milimétrica del espectro electromagnético surgieron en la década de los sesentas como una extensión de las observaciones en radio a longitudes de onda más cortas, en la actualidad constituyen una ventana abierta para estudiar tanto el universo a alto *redshift* como procesos de formación estelar en nuestra galaxia. El origen de la radiación submilimétrica y milimétrica en galaxias es el polvo interestelar calentado por fotones ultravioleta provenientes de estrellas masivas en regiones de formación estelar.

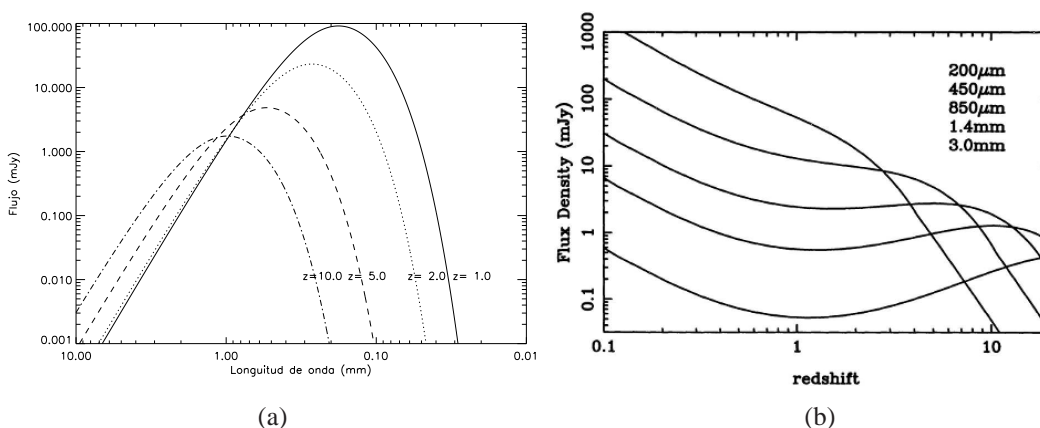
La ventaja de las observaciones en el (sub)milimétrico en comparación con las realizadas en el óptico, cercano infrarrojo y rayos-X radica en que las últimas están limitadas a observar solo los objetos más luminosos a distancias mayores, esto es debido a dos efectos: la dilución de la radiación con la distancia y a la expansión del universo (efecto llamado *cosmological dimming*). El brillo detectable de los objetos tiene una fuerte dependencia con el *redshift* de la forma:

$$B \propto (1 + z)^{-4} \quad (1.2)$$

donde  $B$  corresponde al brillo superficial (el factor adicional  $(1+z)^{-2}$  proviene del *cosmological dimming* y se le conoce como **corrección-K**).

Los ambientes oscurecidos por el polvo, como los núcleos activos de galaxias (AGN) y las galaxias infrarrojas ultra-luminosas (ULIRG), son los responsables de la emisión de radiación térmica en el universo lejano. La radiación del polvo interestelar tiene su máximo de emisión en el infrarrojo intermedio  $\sim 60\mu\text{m}$ . La expansión del universo desplaza este máximo a longitudes de onda más largas como el submilimétrico y milimétrico (Figura 1.2(a)), es decir, a una mayor distancia observamos una región que emite una mayor potencia, este efecto puede contrarrestar incluso la dilución de la radiación con la distancia, por esta razón las observaciones en el milimétrico se realizan con una **corrección-K negativa**.

Consideremos un ULIRG con una tasa de formación estelar de  $\sim 100M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ , el flujo observado en la banda de  $\lambda = 1.4\text{mm}$  es  $\sim 1\text{mJy}$  si este se encuentra a  $z = 1$ . La corrección-K negativa en estas observaciones tiene la gran ventaja de mantener el flujo observado de este objeto casi constante en el intervalo  $z = 1 - 10$  (Figura 1.2(b)), es decir, las observaciones en el milimétrico alrededor de esta longitud de onda se realizan sobre objetos cuyo flujo está débilmente relacionado con el *redshift*.

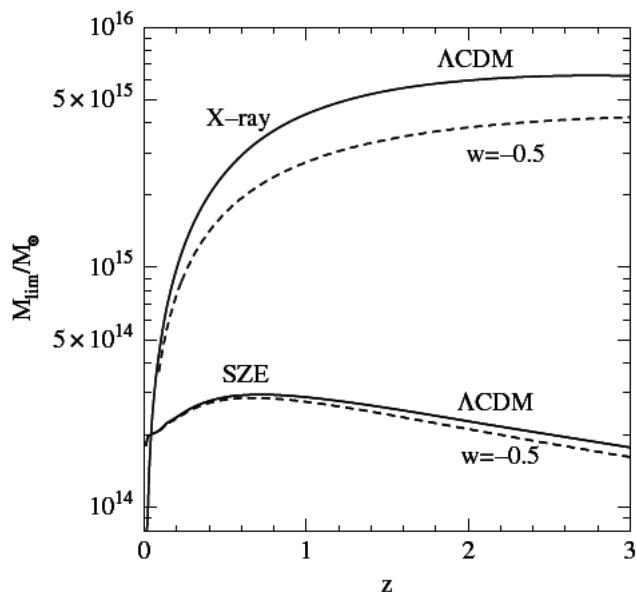


**Figura 1.2:** (a) Desplazamiento observado del espectro de emisión de polvo interestelar a una temperatura  $\sim 50\text{K}$  para un ULIRG con la luminosidad de Arp220  $L_{FIR} \simeq 2 \times 10^{12}L_{\odot}$  modelado como un cuerpo gris (un objeto cuya emisividad es menor a la del cuerpo negro, en este caso:  $B_G = B(\nu/\nu_0)^{\beta}$  siendo  $B$  el espectro del cuerpo negro) con un índice espectral  $\beta = 2$  y una frecuencia de corte de  $\nu_0 = 2THz$ , se observa como el máximo en la emisión se desplaza alrededor de la banda de  $1\text{mm}$  a  $z \simeq 10$ . (b) Estimación del flujo observable en las bandas milimétricas y submilimétricas debido a la corrección-K negativa para Arp220. (Tomado de [25]). El flujo observado a  $1.4\text{mm}$  es casi constante  $\simeq 1\text{mJy}$  en el intervalo  $z \simeq 1 - 10$ . Este cálculo supone que la luminosidad en el infrarrojo de este objeto  $L_{FIR}$  no evoluciona con el *redshift*.

El ICM en los cúmulos de galaxias se observa en el milimétrico por la dispersión Compton inversa de los fotones del fondo de radiación cósmica (CMB por sus siglas



en inglés) generando una pequeña fluctuación en el brillo superficial con respecto al brillo intrínseco del CMB (este tema se trata a fondo en el Capítulo 2), esta dispersión se conoce como **Efecto Sunyaev-Zel'dovich** [59] y tiene la ventaja de ser un efecto independiente del *redshift* a primer orden.



**Figura 1.3:** Estimación del límite de detección de cúmulos de galaxias en función de su masa virial para observaciones en rayos-X y del efecto Sunyaev-Zel'dovich (Tomado de [12]). Las masas y los *redshifts* de los cúmulos fueron obtenidos empleando simulaciones numéricas suponiendo dos modelos cosmológicos distintos ( $\Lambda$ CDM en línea sólida y  $\Lambda$ CDM con  $w = 0.5$  en la ecuación de estado de la energía oscura en línea discontinua).

El efecto Sunyaev-Zel'dovich es de gran importancia en la cosmología ya que permite realizar observaciones de cúmulos de galaxias hasta un límite determinado por la masa del mismo y no por la luminosidad del mismo como es el caso de las observaciones del ICM en rayos-X. Las observaciones con telescopios como Chandra y XMM-Newton están limitadas a observar cúmulos con una masa superior a  $5 \times 10^{15} M_{\odot}$  a  $z > 1$  (Figura 1.1.2). Las observaciones actuales del efecto Sunyaev-Zel'dovich, en contraste, están limitadas por un umbral de detección en masa  $\simeq 2 \times 10^{14} M_{\odot}$  a  $z > 1$ , con la ventaja adicional de tener una eficiencia en búsquedas de cúmulos de galaxias casi constante a *redshift*  $z > 1$ .

La eficiencia constante en las observaciones del efecto Sunyaev-Zel'dovich está sustentada en que el tamaño angular de los cúmulos de galaxias se mantiene casi constante después de  $z > 0.5$ . Este hecho ha sido confirmado por las observaciones de cúmulos de galaxias (Figura 1.4) tanto del efecto Sunyaev-Zel'dovich como de rayos-X.

En conclusión, la fortaleza de realizar estudios en longitud de onda milimétrica radica en que objetos a moderado y alto *redshift* ( $z = 1 - 20$ ) son detectables, lo cual

es ideal para determinar parámetros cosmológicos debido a que las diferencias entre modelos cosmológicos tiene un mayor contraste a *redshift* mayores.

### 1.1.3. Cúmulos de galaxias y la cosmología

El modelo cosmológico estándar [40] propone un universo con geometría plana, de baja densidad, con constante cosmológica ( $\Omega_M = 0.27, \Omega_\Lambda = 0.73$ ). Este modelo nos permite realizar un análisis de la dinámica y evolución de nuestro universo con la ventaja de estar justificado por las observaciones cosmológicas actuales como: el espectro de potencia del CMB, la reproducción mediante simulaciones numéricas de la estructura a gran escala, etc.

La desventaja de este paradigma radica en proponer que el universo esta compuesto en un poco más del 96 % por dos especies “obscuras” la materia oscura y la energía oscura, las cuales son los principales actores en la evolución del universo.

La materia oscura es una especie que no interactúa más que gravitacionalmente con el resto de las especies en el universo, por lo tanto, su presencia solo puede inferirse por su interacción con la radiación y la materia bariónica. En los cúmulos de galaxias, su presencia se infiere a partir de las observaciones de la dispersión de velocidades de las galaxias dentro del cúmulo, la magnitud del efecto de lente gravitacional, y la temperatura del medio intracúmulo. Las observaciones concluyen que la materia bariónica representa de un 10 % a 20 % de la masa total del cúmulo.

La energía oscura es la responsable de generar la expansión acelerada del universo, tiene una densidad de energía constante en el tiempo, por lo que se le denomina **constante cosmológica** ( $\Lambda$ ) y que parece originalmente en las ecuaciones de campo de Einstein. Este modelo supone que la energía de vacío es el ente físico que la origina, sin embargo, mediante una demostración relativamente sencilla se encuentra que la densidad de energía del vacío en el principio del universo es 120 ordenes de magnitud superior a la de hoy en día, lo cual se conoce como el problema del “ajuste fino” [63].

Los modelos propuestos para resolver este problema suponen la evolución de la densidad la energía oscura con el tiempo cósmico, en este contexto la ecuación de Friedmann:

$$\begin{aligned} H^2(z) &= H_0^2 E(z) \\ &= H_0^2 [\Omega_M(1+z)^3 + (1 - \Omega_M - \Omega_{DE})(1+z)^4 + \Omega_\Lambda] \end{aligned} \quad (1.3)$$

se transforma en:

$$H^2(z) = H_0^2 [\Omega_M(1+z)^3 + (1 - \Omega_M - \Omega_{DE})(1+z)^4 + \Omega_{DE}(1+z)^{-3(1+w(z))}] \quad (1.4)$$

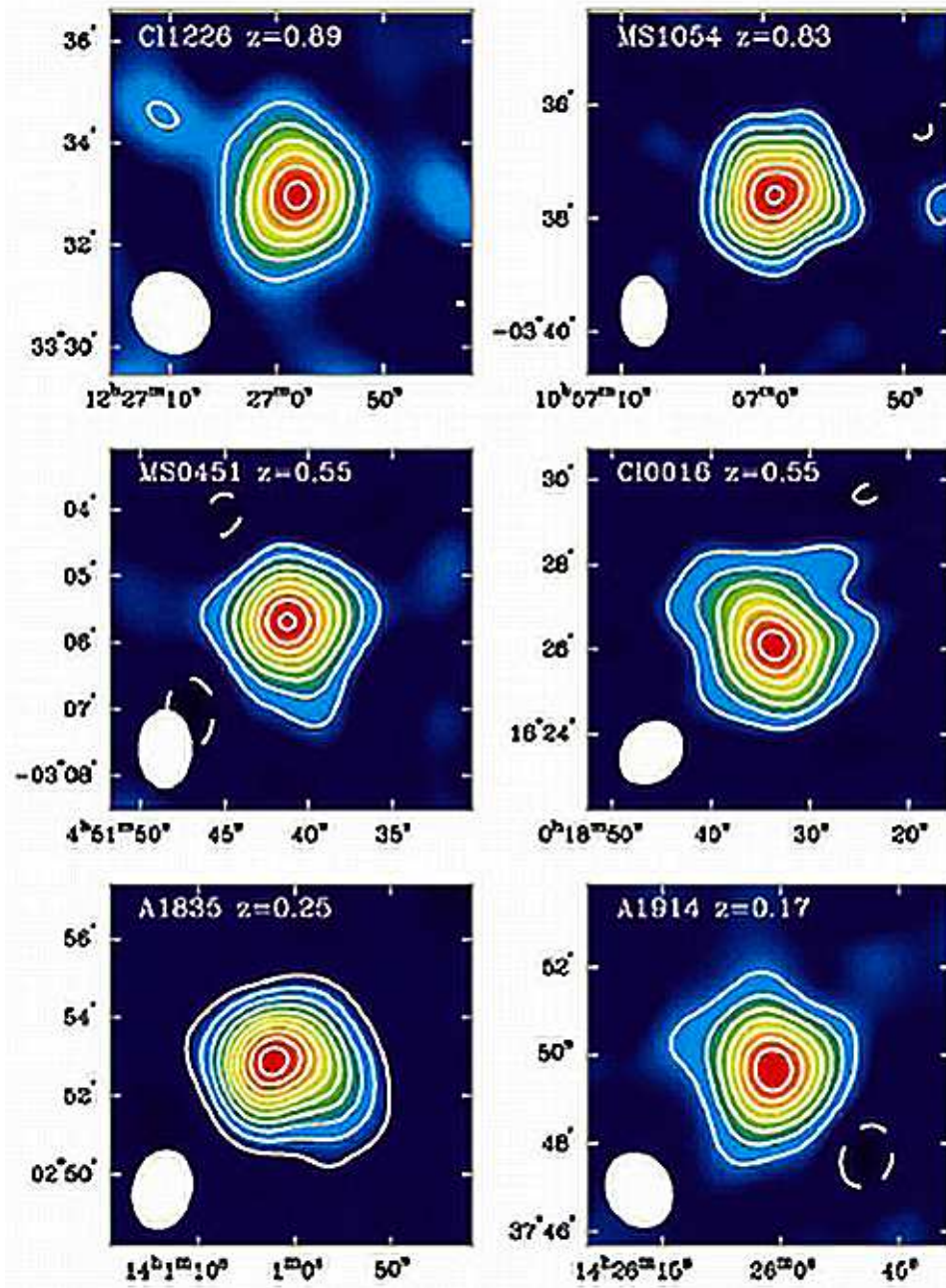
donde  $H_0$  es la constante de Hubble y suele parametrizarse como  $H_0 = 100h$  km s<sup>-1</sup>Mpc<sup>-1</sup>,  $w(z) = P/\rho$  siendo  $P$  la presión y  $\rho$  la densidad, esta relación se conoce

como la **ecuación de estado** ( $w(z) = -1$  recupera el modelo con constante cosmológica). Se han propuesto varios candidatos como los entes físicos que representan a la energía oscura, cada uno de ellos con una ecuación de estado diferente, como la quintaesencia ( $w(z) = c < -1/3$ ), campos escalares  $w(z) = w_0 + w_1 z / (1 + z)$  o modelos más complicados (véase [48]).

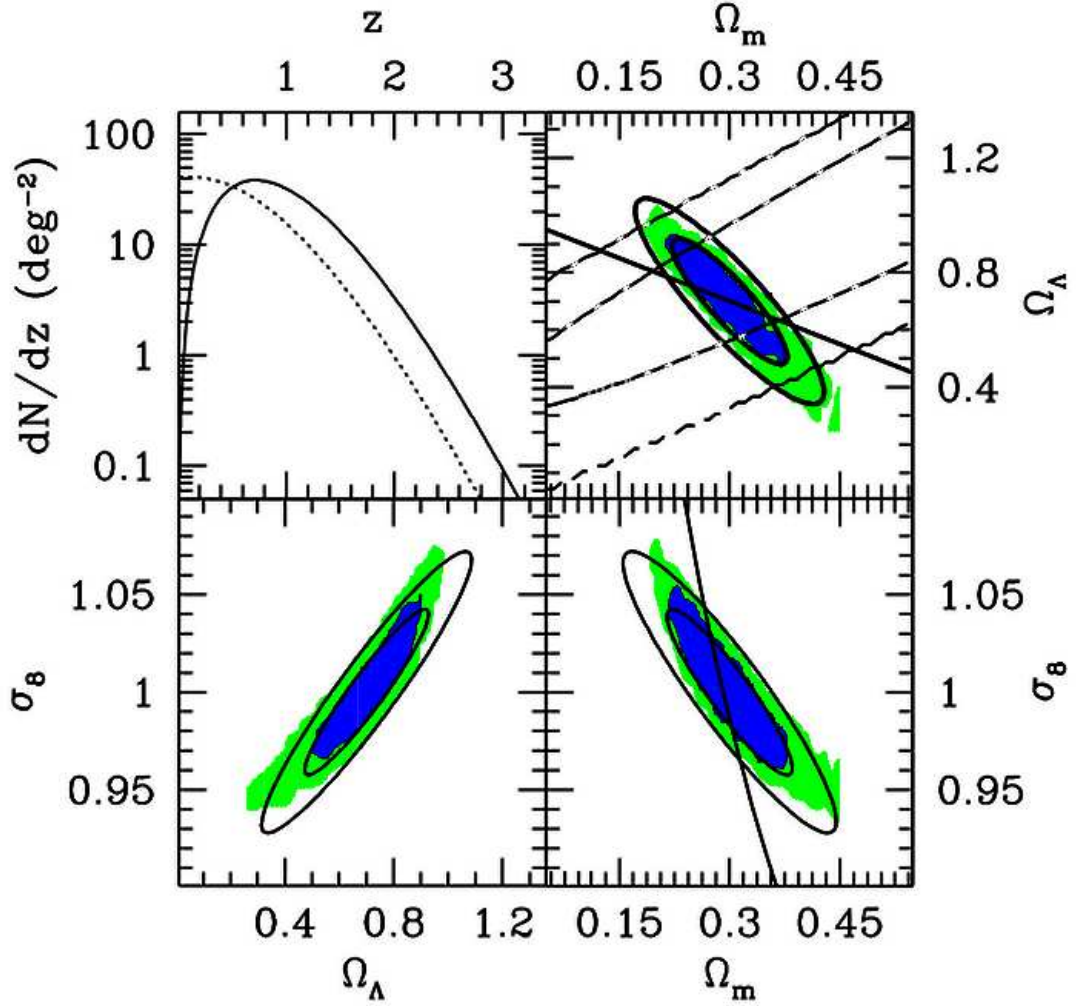
Las observaciones de supernovas tipo Ia, oscilaciones bariónicas acústicas (BAO) y los cúmulos de galaxias en el universo cercano establecen una restricción importante:  $w \simeq -1$  a  $z = 0$ , sin embargo, las observaciones actuales no restringen el valor de  $w$  en otro instante de la evolución del universo[32].

Los modelos teóricos y las simulaciones pueden predecir, para un modelo cosmológico determinado, las propiedades de los cúmulos de galaxias como: la función de masa, el tamaño angular, la distribución de velocidad peculiar, la densidad numérica, y su evolución con el *redshift*.

Confrontar estas predicciones con las observaciones de cúmulos de galaxias permite establecer fuertes restricciones en los valores de  $\Omega_M$ ,  $\Omega_\Lambda$ ,  $w$ , el parámetro de normalización  $\sigma_8$  del espectro de potencia del CMB y la fracción de bariones primordial ( $f_b = \Omega_B / \Omega_M$ ). La Figura 1.5 muestra un ejemplo de las restricciones que establece la función de densidad de cúmulos de galaxias por unidad de *redshift* al espacio de parámetros definido por  $\Omega_M$ ,  $\Omega_\Lambda$  y  $\sigma_8$ .



**Figura 1.4:** Observaciones del efecto Sunyaev-Zel'dovich realizadas mediante interferometría en el radiotelescopio OVRO para cúmulos de galaxias a  $z < 1$ . (Tomado de [13]). Los contornos están separados a intervalos de  $2\sigma$  ( $25\mu K \leq \sigma \leq 70\mu K$ ), las elipses en color blanco indican el tamaño del haz sintético. Las fuentes puntuales fueron retiradas de los mapas gracias a la alta resolución de estas observaciones. Nótese que la magnitud del efecto es aproximadamente la misma sin importar el *redshift* del cúmulo, resaltando la independencia del efecto Sunyaev-Zel'dovich con la distancia.



**Figura 1.5:** Simulación de las restricciones impuestas al modelo  $\Lambda$ CDM en el espacio de parámetros definido por  $\Omega_M$ ,  $\Omega_\Lambda$  y  $\sigma_8$ , a partir de la densidad por intervalo de *redshift* de cúmulos de galaxias con una masa mayor a  $10^{14}h^{-1}M_\odot$  (Tomado de [13]). En el panel superior izquierdo se muestra la densidad de cúmulos de galaxias en línea continua y la distribución acumulada en línea discontinua. Las proyecciones sobre los planos de  $\Omega_M - \Omega_\Lambda$ ,  $\sigma_8 - \Omega_M$  y  $\sigma_8 - \Omega_\Lambda$  aparecen en los paneles superior derecho, inferior izquierdo e inferior derecho respectivamente. En el plano  $\Omega_M - \Omega_\Lambda$  la línea recta representa los universos con geometría plana  $\Omega_T = 1$ , los elipsoides en línea discontinua representan las restricciones impuestas por las SNIa. En el plano  $\sigma_8 - \Omega_M$  la línea continua muestra la tendencia en las restricciones actuales. Los elipsoides de probabilidad al 68 % y 95 % son calculados a partir de la matriz de Fisher (contornos gaussianos). Las áreas en azul y verde representan las regiones de probabilidad al 68 % y 95 % calculados mediante método Montecarlo.



# Capítulo 2

## El Efecto Sunyaev-Zel'dovich

### 2.1. Física del Efecto Sunyaev-Zel'dovich

El efecto Sunyaev-Zel'dovich (SZE por sus siglas en inglés) consiste en una interacción Compton inverso entre un fotón del fondo cósmico de microondas (CMB) y un electrón de alta temperatura (del orden de a  $10^8$  °K  $\simeq$  8.6keV) produciendo un cambio en el brillo aparente del CMB en la dirección de cúmulos de galaxias y regiones donde hay grandes concentraciones de gas caliente.

#### 2.1.1. Dispersión Compton Inversa

El cambio en la energía de un fotón debido a la interacción con un electrón se describe mediante la fórmula de la dispersión de Compton, (eligiendo el marco de referencia en el cual el electrón esté en reposo):

$$\epsilon = \frac{\epsilon'}{1 + \frac{\epsilon}{m_e c^2}(1 - \cos\phi_{12})} \quad (2.1)$$

donde  $\epsilon$  y  $\epsilon'$  corresponden a la energía del electrón antes y después de la interacción y  $\phi_{12}$  es el ángulo de deflexión del fotón, en el límite cuando la energía del fotón es pequeña y los electrones son no relativistas, es decir  $\epsilon \ll m_e c^2 \simeq 510\text{keV}$  tenemos que  $\epsilon \rightarrow \epsilon'$  obtenemos una colisión elástica y podemos emplear la sección diferencial de Compton para simplificar los cálculos.

El cambio en la frecuencia en el marco de referencia del observador debido a la interacción está dado por:

$$v' = v \frac{1 + \beta\mu'}{1 - \beta\mu} \quad (2.2)$$

donde  $v$ ,  $v'$  corresponden a la frecuencia antes y después de la interacción y  $\mu =$

$\cos(\phi)$  siendo  $\phi$  el ángulo de incidencia del fotón sobre el electrón y  $\mu' = \cos(\phi')$  es la dirección del fotón después de la interacción. De esta manera obtenemos la distribución de probabilidad de la dispersión debido a un solo electrón como:

$$P(s; \beta)ds = \int p(\mu)d\mu \phi(\mu'; \mu) \left( \frac{d\mu'}{ds} \right) ds \quad (2.3)$$

donde  $p(\mu)$  es la probabilidad de que el ángulo de incidencia del fotón tenga el valor  $\mu$ ,  $\phi(\mu'; \mu)$  es la probabilidad de dispersar el fotón en un ángulo  $\mu'$ ,  $s = \log(\frac{v'}{v})$  y la velocidad electrónica se parametriza en función de  $\beta$  como  $v_e = \frac{\beta}{c}$ .

### Dispersión debido a una población de electrones

Para el caso en el que la distribución de velocidades de los electrones obedece una estadística Maxwelliana tenemos que:

$$p(\beta)d\beta = \frac{\gamma^5 \beta^2 e^{\frac{\gamma}{\beta}} d\beta}{\Theta K_2(\Theta^{-1})} \quad (2.4)$$

donde  $\Theta = \left( \frac{k_b T_e}{m_e c^2} \right)$  es la temperatura adimensional y  $K_2$  es la función modificada de Bessel de segundo orden y de segunda especie. Encontramos la probabilidad de que un fotón sea dispersado una vez de la forma:

$$P(s) = \int_{\beta_{lim}}^1 p_e(s) P(s; \beta) d\beta \quad (2.5)$$

donde  $\beta_{lim}$  es la velocidad mínima necesaria para generar un cambio de frecuencia  $s$  en el fotón y se define como:

$$\beta_{lim} = \frac{e^{|s|} - 1}{e^{|s|} + 1} \quad (2.6)$$

Para el caso del ICM, donde la profundidad óptica cumple la condición  $\tau_e \ll 1$ , podemos tomar en cuenta solo dos casos: el primero en el cual no hay interacción entre el fotón y los electrones, y el segundo en donde solo hay una dispersión ocasionada por un solo electrón en el trayecto del fotón dentro del ICM. El efecto en el espectro del CMB por la dispersión es:

$$I(v) = \int_{-\infty}^{\infty} P(s) I_0(v_0) ds \quad (2.7)$$

donde  $v_0$  es la frecuencia del fotón antes de la interacción, e  $I_0$  es el espectro de cuerpo negro del CMB:



$$I_0(v) = \frac{2hv^3}{c^2} (e^{hv/k_b T_{CMB}} - 1)^{-1} \quad (2.8)$$

encontramos la fluctuación en el espectro del CMB como:

$$\Delta I_0(v) = \frac{2h}{c^2} \int_{-\infty}^{\infty} P(s) \left( \frac{v_0^3}{e^{hv_0/k T_{rad}} - 1} - \frac{v^3}{e^{hv/k T_{rad}} - 1} \right) ds \quad (2.9)$$

La ecuación 2.9 refleja una de las características más importantes del SZE, la fluctuación en la intensidad del CMB es **independiente de la distancia**.

### 2.1.2. Aproximación de Kompaneets

La aproximación de Kompaneets describe el proceso de dispersión, en el límite no relativista, modelando el número de ocupación de los fotones como un proceso de difusión, lo cual permite escribir la ecuación 2.7 como:

$$I(v) = \int_{-\infty}^{\infty} P_K(s) I_0(v_0) ds \quad (2.10)$$

siendo  $P_K(s)$  es una distribución gaussiana de la forma:

$$P_K(s) = \frac{1}{\sqrt{4\pi y}} \exp \frac{(s + 3y)^2}{4y} \quad (2.11)$$

donde  $y$  se conoce como el parámetro de Compton y describe la presión integrada de la nube de electrones a lo largo de la línea de visión del observador.

$$y = \int \frac{k_B \sigma_T}{m_e c^2} n_e T_e dl \quad (2.12)$$

donde  $\sigma_T$  es la sección eficaz de Thompson,  $n_e$  es la densidad de electrones y  $T_e$  es la temperatura electrónica. El parámetro de Compton provee de una descripción de los parámetros físicos del medio observado, como ejemplo, un cúmulo masivo de galaxias de masa  $\sim 10^{15} M_\odot$  posee un parámetro de Compton del orden de  $y \simeq 10^{-4}$ .

### 2.1.3. SZE térmico

El SZE Térmico (TSZE) considera únicamente la dispersión debida a los electrones termalizados del medio intracúmulo, en este caso se utiliza la aproximación de Kompaneets para obtener la fluctuación  $\Delta I(v)$  como:

$$\Delta I(x) = yg(x)I_0 \quad (2.13)$$

donde  $x = \frac{h\nu}{kT_{CMB}}$  es la frecuencia adimensional e  $I_0 = \frac{2h}{c^2} \left(\frac{kT_{CMB}}{h}\right)^3$  es la intensidad específica del CMB. La función  $g(x)$  contiene la dependencia en frecuencia del SZE y está dada por la expresión:

$$g(x) = \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} (x \coth(x/2) - 4) \quad (2.14)$$

En radioastronomía es usual describir las fluctuaciones del CMB en función de la temperatura de brillo, en este caso, la fluctuación en temperatura del SZE esta dada por:

$$\Delta T = y f(x) T_{CMB} \quad (2.15)$$

$$f(x) = x \coth(x/2) - 4 \quad (2.16)$$

En este caso la aproximación de Kompaneets tiene como ventaja el poder modelar la fluctuación consecuencia del TSZE mediante una función analítica sencilla y permite el análisis de las propiedades físicas en un amplio rango de temperaturas electrónicas. Una de las ventajas de este efecto es su forma espectral, poco común en los fenómenos astrofísicos (véase Figura 2.1), se observa un mínimo en la variación  $\Delta I(x)$  aproximadamente en 120 GHz ( $\lambda \simeq 2.4mm$ ), un “nulo” o variación cero en 220GHz ( $\lambda \simeq 1.4mm$ ) y un máximo en 370GHz ( $\lambda \simeq 0.80mm$ ).

Aunque esta expresión no es valida para temperaturas electrónicas  $T_e \gtrsim 15keV$  pueden encontrarse correcciones relativistas mediante la integración numérica de la ecuación de Boltzmann o expandiendo  $P(s)$  en series de potencias para encontrar una función analítica de la forma:

$$\Delta I(x) = yg(x)(1 + \delta_{rel})I_0 \quad (2.17)$$

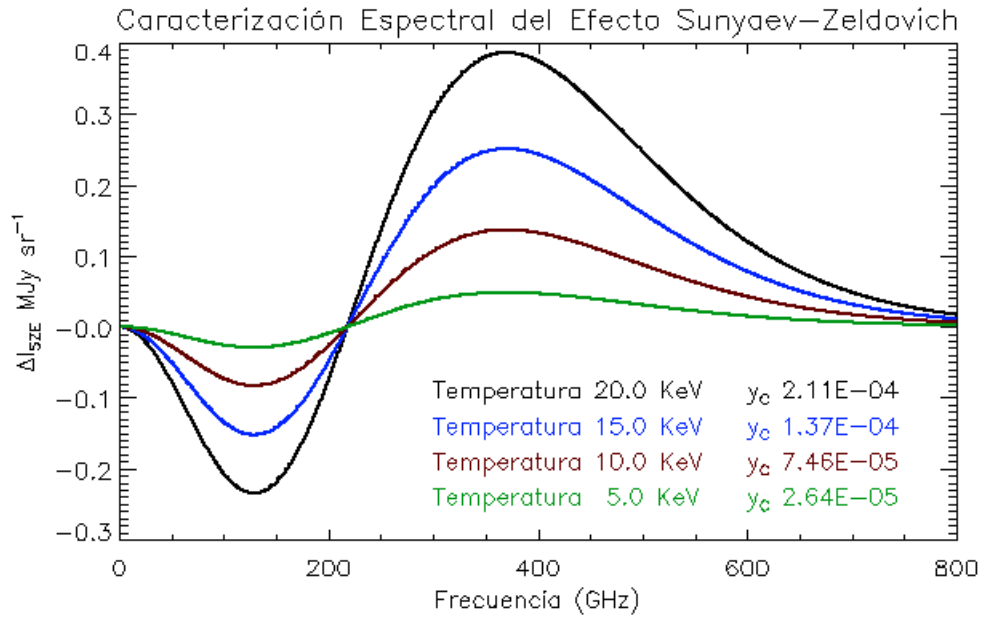
$$\delta_{rel} = \sum_{i=1}^n \Theta^i Y_i(x) + R(x, \Theta) \quad (2.18)$$

donde  $\Theta$  es de nuevo la temperatura adimensional,  $R_i$  es una función residual de la expansión en serie, las formas analíticas de  $Y_i$  y  $R_i$  pueden obtenerse de [26, 39].

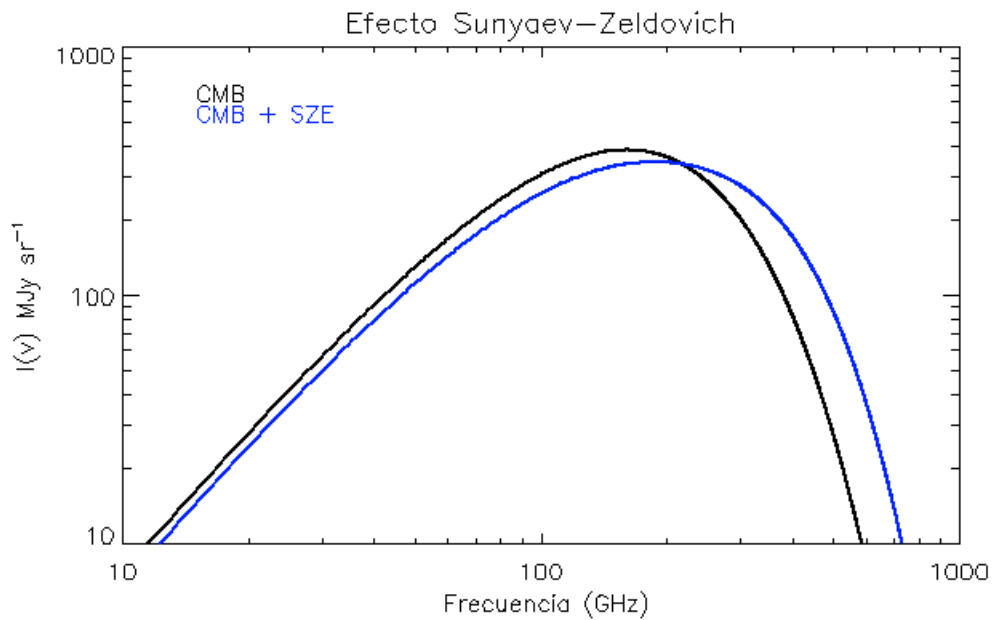
#### 2.1.4. SZE cinemático

El SZE cinemático (kSZE por sus siglas en inglés) surge debido a la velocidad global del medio dispersor con respecto al CMB, generando una anisotropía dipolar en la radiación de fondo, la interacción entre los fotones del CMB y los electrones libres provoca que en el marco de referencia del observador una fluctuación en la intensidad dada por las expresiones:

## 2.1. Física del Efecto Sunyaev-Zel'dovich



(a)



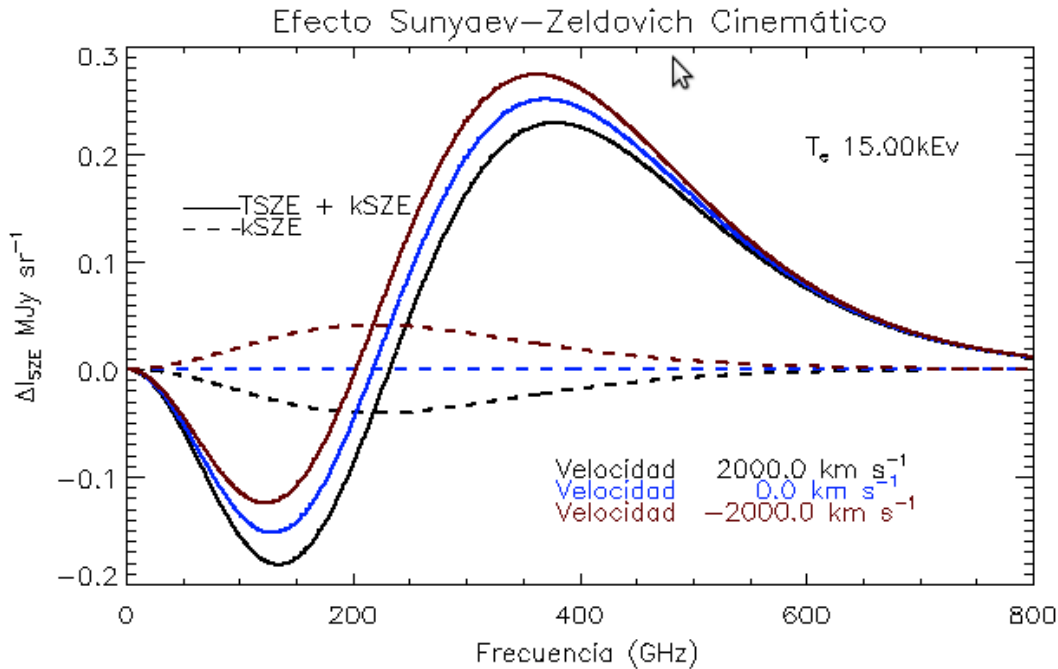
(b)

**Figura 2.1:** (a) Forma espectral del incremento  $\Delta I(x)$  del TSZE debido a un plasma a diferentes temperaturas y parámetro de Compton central suponiendo un modelo- $\beta$  (Véase 2.2.1). (b) Efecto sobre el espectro del CMB debido al SZE, en esta gráfica el parámetro de Compton ha sido exagerado dos ordenes de magnitud (esto es  $y \simeq 10^{-2}$ ) para mostrar la variación con mayor claridad.

$$\Delta I(x) = -\tau_e \frac{v_p}{c} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} I_0 \quad (2.19)$$

$$\Delta T_{SZE} = -\tau_e \frac{v_p}{c} T_{CMB} \quad (2.20)$$

donde  $v_p$  es la velocidad peculiar del medio en la línea de visión del observador y  $\tau_e$  es la profundidad óptica  $\tau_e = \int n_e \sigma_T dl$ .



**Figura 2.2:** Espectro del kSZE (línea discontinua) para un cúmulo con un ICM de temperatura 15keV y una velocidad peculiar en la línea de visión de  $\pm 2000 \text{ km s}^{-1}$ , la línea continua muestra la contribución del efecto cinemático al efecto térmico. Nótese que la banda que corresponde a la variación nula del TSZE delata la presencia del kSZE.

En las observaciones se incluyen las contribuciones de ambos efectos simultáneamente—,en general, el efecto cinemático es un orden de magnitud menor en comparación con el efecto térmico, por lo tanto, separar ambos efectos es complicado. En la Figura 2.2 se observa como modifica el efecto cinemático al efecto térmico. El efecto neto puede describirse por el desplazamiento en frecuencia del máximo, mínimo y nulo del efecto.

## 2.2. Describiendo cúmulos de galaxias con el SZE

Los cúmulos de galaxias son el mayor constituyente de la estructura a gran escala del universo; el número de cúmulos por unidad de volumen, su distribución espacial (clustering) y propiedades físicas (temperatura, masa) trazan las características del universo y su evolución con el tiempo. Dentro de los cúmulos de galaxias la mayor parte de la materia bariónica se presenta en forma de gas difuso, ionizado ( $T \sim 10\text{keV}$ ) conocido como medio intracúmulo (ICM), debido a esta alta temperatura los cúmulos de galaxias pueden ser detectados utilizando el SZE.

La independencia de la distancia (o *redshift*) del SZE, hace que las búsquedas de cúmulos estén limitadas por la masa del cúmulo, determinado por el pozo de potencial o la temperatura, por el contrario de otras observaciones que están limitadas por la luminosidad del mismo (como es el caso de estudios en rayos-X, y en longitud de onda óptica).

Una de las desventajas de las observaciones del SZE hacia cúmulos de galaxias radica en la descripción del ICM dentro del cúmulo. En la sección anterior se encontró que la información de los parámetros físicos que caracterizan al medio dispersor está contenida dentro del parámetro de Compton  $y$ . Para recuperar la masa de los cúmulos se utiliza la ecuación 1.1 y los perfiles radiales de temperatura y densidad del ICM. Sin embargo, el parámetro de Compton presenta una degeneración de estas cantidades, por lo tanto, se requiere de modelos que nos permitan recuperar estos perfiles.

### 2.2.1. Descripción del medio intracúmulo

#### Modelo $\beta$

Es el modelo más sencillo para la descripción del ICM, se considera que es un fluido autogravitante, completamente relajado, en equilibrio termodinámico y de temperatura constante (medio isoterma), bajo estas consideraciones se encuentra que el medio se distribuye con geometría esférica. La densidad en función de la distancia al centro del cúmulo está dada por:

$$n_e(\mathbf{r}) = n_{e0} \left( 1 + \frac{r^2}{r_c^2} \right)^{-3\beta/2} \quad (2.21)$$

donde  $n_{e0}$  es la densidad central del cúmulo,  $r_c$  es el radio del núcleo del cúmulo y  $\beta$  es el parámetro que describe como la densidad disminuye a las afueras del cúmulo, toma valores  $2/3 \leq \beta \leq 1$ . Este modelo tiene la ventaja de poseer expresiones analíticas para el parámetro de Compton central  $y_0$  ya integrado a lo largo de la línea de visión:

$$y(r) = y_0 \left( 1 + \frac{r^2}{r_c^2} \right)^{1/2-3\beta/2} \quad (2.22)$$

$$y_0 = n_e \sigma_T r_c \sqrt{\pi} \frac{k_b T_e \Gamma(3/2\beta - 1/2)}{m_e c^2 \Gamma(3/2\beta)} \quad (2.23)$$

Imágenes de cúmulos de galaxias tomadas en el óptico y en rayos-X revelan que en realidad los cúmulos no son isotérmicos, ni se encuentran relajados, al contrario, observaciones del satélite Chandra muestran un gradiente de temperatura en el ICM, así como una gran cantidad de cúmulos bajo interacciones, sin embargo, los autores de artículos reportando el SZE y realizando estimación de parámetros concuerdan en que el error cometido al suponer el modelo  $\beta$  como válido es de orden del 10 – 20 %.

### Modificaciones al modelo $\beta$

Existen varias formas de perturbar el modelo  $\beta$  para ajustar las observaciones, la más sencilla es suponer un modelo  $\beta$  doble de la forma:

$$n_e(r) = f \left(1 + \frac{r^2}{r_{c1}^2}\right)^{-3\beta_1/2} + (1 - f) \left(1 + \frac{r^2}{r_{c2}^2}\right)^{-3\beta_2/2} \quad (2.24)$$

(véase [33, 69]) esta modificación permite analizar errores sistemáticos introducidos al asumir un modelo  $\beta$  sencillo, además permite reproducir la distribución del ICM observada en algunos cúmulos conocida como “cooling core”, es decir, una región de mayor densidad y menor temperatura hacia el centro del cúmulo en comparación con el modelo- $\beta$ .

### Perfil Navarro Frenk White

Otra de las elecciones comunes en la literatura para describir el ICM es suponer equilibrio hidrostático con el halo de materia oscura dentro del que se encuentra el cúmulo [33], la densidad de materia oscura de acuerdo al perfil Navarro-Frenk-White (NFW) se describe por la expresión:

$$\frac{\rho_{DM}(r)}{\rho_c(z)} = \frac{\delta_c}{(r/r_s)(1 + r/r_s)^2} \quad (2.25)$$

donde  $r$  es la distancia radial desde el centro del cúmulo,  $\rho_c(z)$  es la densidad crítica del universo a un *redshift*  $z$  determinado,  $r_s = r_{200}/c$  es el radio característico del cúmulo y es función de  $r_{200}$  el radio en el cual la densidad del halo es 200 veces la densidad crítica del universo, y del parámetro de libre  $c$  que representa la concentración del halo de materia oscura; por último  $\delta_c$  se relaciona con  $c$  por la expresión:

$$\delta_c = \frac{200}{3} \frac{c^3}{\ln(1 + c) - c/(1 + c)} \quad (2.26)$$

para recuperar los perfiles de densidad y temperatura se considera que el ICM está en equilibrio hidrostático con el halo de materia oscura mediante la integración numérica de la ecuación:

$$\frac{4\pi}{3}\rho_{DM}(< r) = -\frac{rk_B T}{G\mu m_p} \left( \frac{d \ln \rho_{gas}}{d \ln r} + \frac{d \ln T}{d \ln r} \right) \quad (2.27)$$

donde  $\mu$  es el peso molecular medio ( $\mu = 0.59$  para el gas primordial),  $m_p$  es la masa del protón y  $T$  es la temperatura. La ecuación 2.27 permite incluir la información del perfil de temperatura, el cual se puede obtener mediante observaciones de rayos-X o bien retomar el argumento de medio isoterma ( $\frac{d \ln T}{d \ln r} = 0$ ).

### Perfil autosimilar

Este modelo consiste en una expresión analítica fundamentada en las simulaciones numéricas de materia oscura y en las observaciones de los perfiles de densidad observados por Chandra [36], tiene la ventaja de omitir la integración numérica de la ecuación 2.27 mediante parametrizar el perfil de la presión del cúmulo con la expresión:

$$P(r) = \frac{P_0}{\frac{r}{r_s}^\gamma \left(1 + \frac{r}{r_s}^\alpha\right)^{\frac{\beta-\gamma}{\alpha}}} \quad (2.28)$$

donde  $r_s = r_{500}/c$  siendo  $c$  de nuevo el parámetro de concentración,  $\alpha, \beta, \gamma$  representan la pendiente del perfil en los intervalos  $r \sim r_s, r \ll r_s$  y  $r \gg r_s$  respectivamente; en [36] se presentan los valores de  $(\alpha, \beta, \gamma) = (1.3, 4.3, 0.7)$  como el mejor ajuste a una muestra de cúmulos de alta temperatura ( $T_x > 5keV$ ) observados con Chandra.

## 2.3. Cosmología con cúmulos de galaxias y el SZE

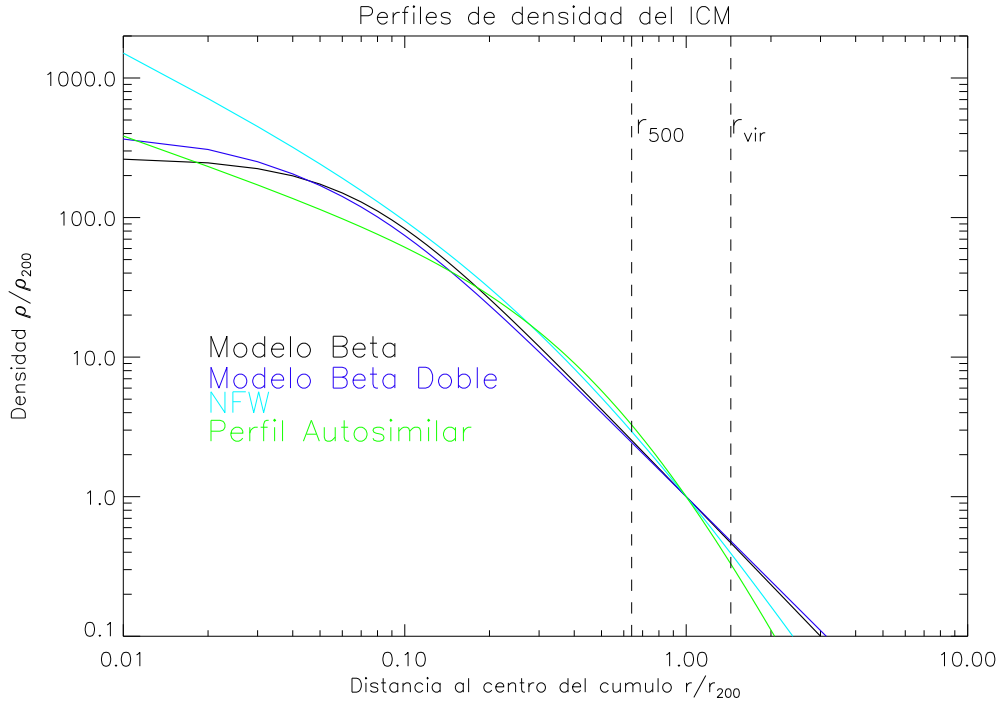
### 2.3.1. La constante de Hubble $H_0$

Las mediciones de la constante de Hubble se basan en usar en forma conjunta la detección del ICM del SZE con la detección en rayos-X, partiendo de la dependencia del brillo superficial en rayos-X tenemos:

$$S_X \propto n_e^2 \Lambda(T_e) L \quad (2.29)$$

donde  $\Lambda$  es la función de enfriamiento,  $n_e$  es la densidad electrónica y  $L$  la profundidad de la línea de visión en el ICM, usando las observaciones del SZE en una banda determinada se elimina la dependencia con la densidad electrónica:

$$\Delta I_{SZE} \propto n_e T_e L \quad (2.30)$$



**Figura 2.3:** Perfiles radiales de densidad para cuatro diferentes distribuciones del ICM. La línea negra corresponde al modelo  $\beta$  con un radio del núcleo  $r_c = 0.07r_{200}$  y  $\beta = 2/3$ . La línea azul muestra un modelo  $\beta$  doble con  $r_{c1} = 0.07r_{200}$ ,  $\beta_1 = 2/3$ ,  $r_{c2} = 0.03r_{200}$ ,  $\beta_2 = 4/5$ . Nótese que la densidad al centro del cúmulo es mayor en comparación del modelo  $\beta$ . La línea azul claro corresponde al perfil Navarro-Frenk-White con un parámetro de concentración  $c = 3.0$ . La línea verde representa el perfil autosimilar con un parámetro de concentración de  $c = 0.5$  y  $\alpha = 1.3$ ,  $\beta = 4.3$ ,  $\gamma = 0.7$ . Nótese que el comportamiento del perfil autosimilar difiere del perfil NFW en las regiones interiores del cúmulo. Las líneas punteadas corresponden a  $r_{500}$  y el radio virial  $r_{vir}$  para un cúmulo distribuido acorde a un modelo beta con  $M = 1 \times 10^{15} M_\odot$  y una dispersión de velocidad de  $\sigma_V = 1000 \text{ km s}^{-1}$ .



y se obtiene para  $L$ :

$$L \propto \frac{\Delta I_{SZE} \Lambda(T_e)}{S_X T_e} \quad (2.31)$$

bajo la suposición de que el cúmulo es una estructura aproximadamente esférica, la longitud  $L$  se traduce al diámetro del cúmulo, de esta forma podemos estimar la distancia al cúmulo mediante:

$$D_A = \frac{L}{\theta_c} \quad (2.32)$$

donde  $\theta_c$  es el tamaño angular del cúmulo y  $D_A$  es la distancia angular.  $D_A$  se relaciona con la distancia mediante la ecuación:

$$D_A = \frac{1}{(1+z)} \frac{1}{H_0} \int_0^z \frac{cdz}{E(z)} \quad (2.33)$$

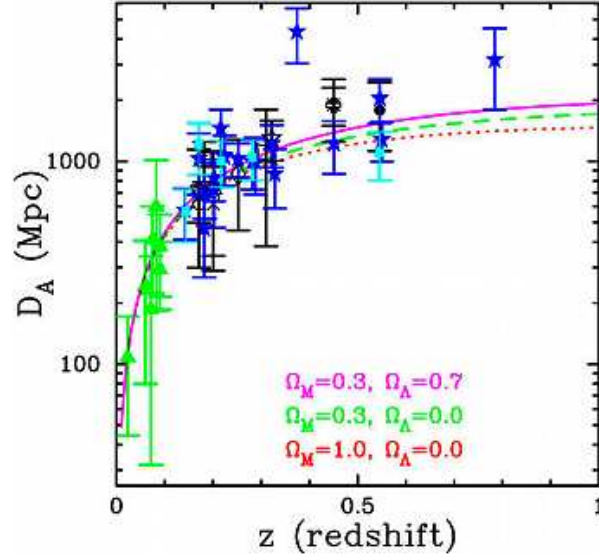
donde  $E(z) = [\Omega_M(1+z)^3 + \Omega_\Lambda]^{1/2}$ . La constante de Hubble se recupera ajustando los valores observados de  $D_A$  a los establecidos por la ecuación 2.33 manteniendo los valores de  $\Omega_M$  y  $\Omega_\Lambda$  fijos.

Bonamente y colaboradores [11] realizaron un estudio con 38 cúmulos de galaxias utilizando mediciones interferométricas de OVRO/BIMA e imágenes en rayos-X de Chandra, hallan un valor de la constante de Hubble de  $H_0 = 73.7 \pm_{4.3}^{4.6} \pm_{7.6}^{9.5} \text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$  (error estadístico más sistemático) para una distribución del gas isotérmica. Determinaciones anteriores de la constante del valor de  $H_0$  únicamente de observaciones del SZE para una muestra de  $\sim 30$  cúmulos de galaxias [46] derivaron en  $H_0 = 60 \text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$  (Figura 2.4).

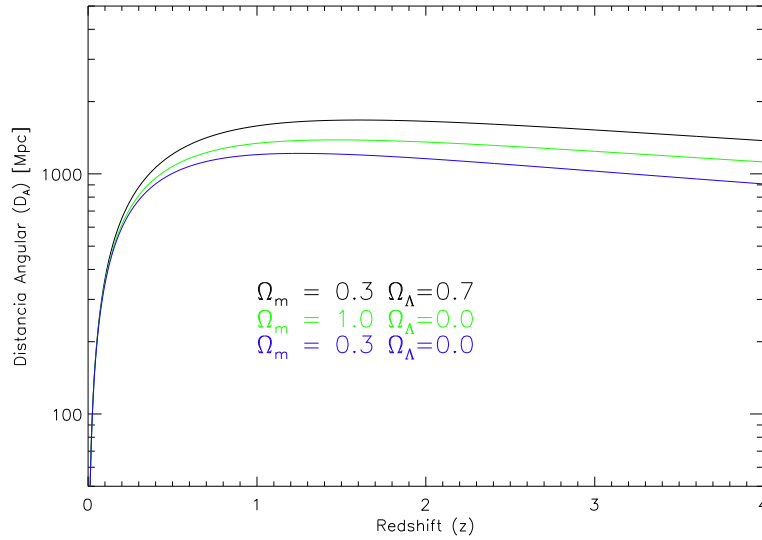
Este método tiene la ventaja de medir el valor de  $H_0$  de forma **independiente** de la escala de distancia, por lo que carece de dependencias en la calibración de la misma, sin embargo, los errores sistemáticos en este método son considerables, lo anterior es consecuencia de suponer la distribución del ICM como esférica y sin perturbaciones, simulaciones realizadas por Sulkanen [58] utilizando un modelo triaxial revelan que se comente un error del 15 % al considerar la distribución del ICM de forma esférica, a la vez, resalta que la presencia de subestructura y de *mergers* incrementan el error sistemático.

### 2.3.2. Fracción bariónica

La fracción de bariones relaciona la cantidad de materia bariónica presente en el universo con la materia total del cúmulo. Esta fracción se utiliza para establecer límites inferiores a  $\Omega_B$  [51]. La fracción bariónica se calcula a partir de la expresión:



(a)



(b)

**Figura 2.4:** (a). Distancia angular inferida mediante observaciones del SZE (Tomado de [46]). Nótese que la diferencia entre los modelos cosmológicos  $\Lambda$ CMD ( $\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$ ), Einstein-deSitter ( $\Omega_m = 1.0, \Omega_\Lambda = 0.0$ ) y baja densidad ( $\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.0$ ) es menor en comparación con los errores en la determinación de la distancia angular en el universo cercano  $z < 1$ . La constante de Hubble supuesta para este gráfico es  $H_0 = 60 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  (b). Distancia angular en función del *redshift* hasta  $z = 4$ . En contraste con (a) se aprecia que los modelos divergen después de  $z = 1$ . Los cúmulos de galaxias pueden ser utilizados para determinar la distancia angular hasta  $z \simeq 3$  (véase Figura 1.5). La constante de Hubble supuesta para este gráfico es  $H_0 = 73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .

$$f_b(r) = \frac{M_{gas}(r) + M_{gal}(r)}{M_T(r)} \quad (2.34)$$

donde  $f_b$  es la fracción de bariones y  $M_T$  es la masa total a un radio determinado, la masa contenida en el ICM es aproximadamente un orden de magnitud mayor a la contenida dentro de las galaxias ( $M_{gas} \simeq 6M_{gal}$ ), entonces la ecuación 2.34 se reduce a:

$$f_b(r) = M_{gas}(r)/M_T(r) \quad (2.35)$$

tanto  $M_{gas}$  como  $M_T$  pueden estimarse usando el SZE y rayos-X (véase [33]) si se cuenta con un estimado de la temperatura electrónica del ICM, para un modelo isoterma se calcula la masa del gas como:

$$M_{gas}(r) \simeq \frac{4\pi r^3}{3} n_e m_p \quad (2.36)$$

donde  $m_p$  es la masa del protón y  $n_e$  puede encontrarse de las ecuaciones 2.23 para observaciones de SZE y 2.29 para observaciones en rayos-X. La masa total se encuentra mediante resolver la ecuación de equilibrio hidrostático 1.1. La fracción de bariones inferida usando los cúmulos de galaxias establece un límite inferior a la densidad de materia  $\Omega_M$  cuando se combina con los modelos de nucleosíntesis primordial (Big Bang Nucleosynthesis) [3].

La Roque y colaboradores [33] realizaron un estudio de la fracción de bariones utilizando el SZE y observaciones de Chandra en una muestra de 38 cúmulos de galaxias, la comparación de los valores de  $f_b$  usando el SZE y rayos-X en forma independiente difieren en no más del 10 %.

### 2.3.3. Relaciones de escala

El escenario de formación jerárquico de la estructura a gran escala predice la dependencia de la temperatura del ICM, la masa del gas de los cúmulos de galaxias en función de la masa total dentro del radio virial. Las observaciones del SZE se traducen en las siguientes relaciones de escala:

$$Y D_A^2 \propto f_{gas} T_e^{5/2} E(z) \quad (2.37)$$

$$Y D_A^2 \propto f_{gas} M_T^{5/2} E(z)^{2/3} \quad (2.38)$$

$$Y D_A^2 \propto f_{gas}^{-2/3} M_{gas}^{5/3} E(z)^{2/3} \quad (2.39)$$

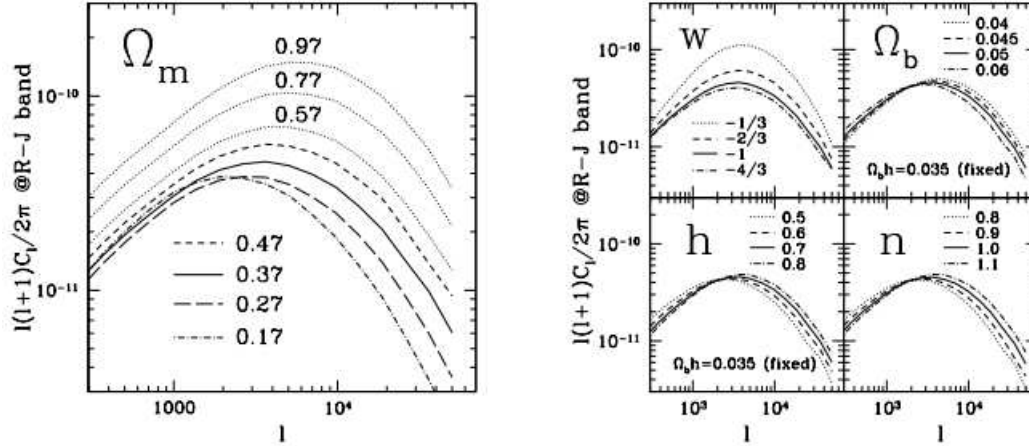
donde  $D_A$  es la distancia angular y  $Y$  es el parámetro de Compton integrado sobre el ángulo sólido que sostiene el cúmulo hasta el radio virial esto es:

$$Y = \int_{\Omega} y d\Omega \quad (2.40)$$

Actualmente las observaciones del SZE no tienen la sensibilidad para detectar el ICM hasta el radio virial del cúmulo, es así, que se realizan los cálculos dentro de  $r_{200}$ , el radio en el cual la densidad es un factor de 200 veces la densidad crítica del universo, Bonamente [11] utilizó una muestra de 38 cúmulos de galaxias, encuentran que las relaciones de escala son consistentes con el modelo autosimilar de evolución de cúmulos de galaxias.

### 2.3.4. Espectro de potencia

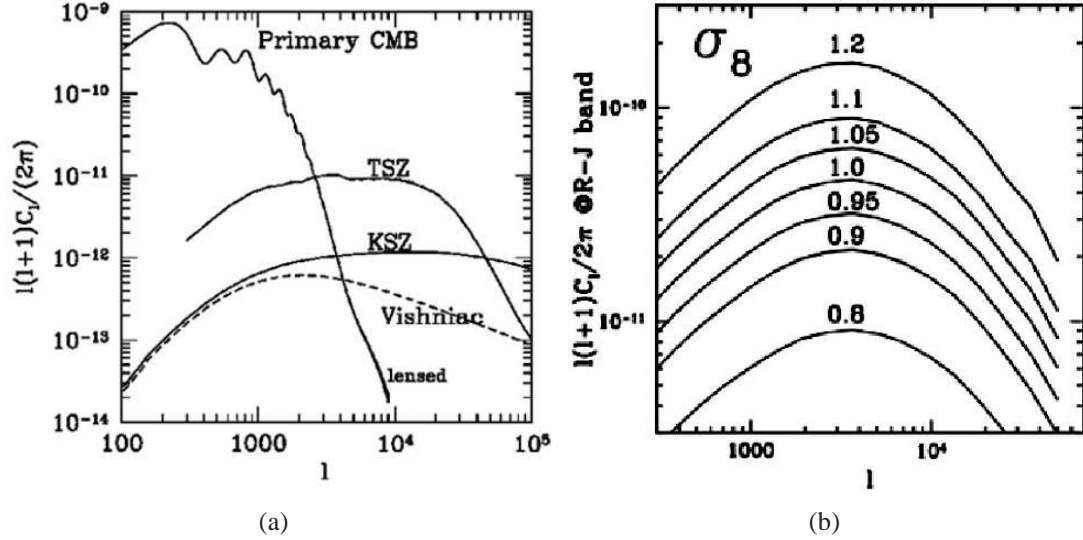
La interacción de los fotones del CMB con la estructura a gran escala introduce fluctuaciones secundarias en el espectro de potencia angular del mismo, en diferentes escalas angulares. La contribución del SZE a este espectro de potencia sucede en escalas del orden de arco minutos y permite realizar restricciones a los parámetros cosmológicos (véase Fig. 2.5), sin embargo, estas restricciones suelen ser dependientes de un modelo de evolución de perturbaciones empleado para determinar el tamaño y masas de los cúmulos.



**Figura 2.5:** Desplazamiento del espectro de potencias del SZE para diferentes valores de los parámetros cosmológicos (Tomado de [30]). Las gráficas muestran las variaciones en potencia y en número de multipolo  $l$  del espectro en función de los valores de los parámetros cosmológicos:  $\Omega_M$ ,  $w$  (el coeficiente en la ecuación de estado de la energía oscura),  $\Omega_B$ ,  $h$  (la parametrización de la constante de Hubble  $H_0 = 100h\text{km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ ) y  $n$  (la pendiente del espectro de potencia de las fluctuaciones del CMB).

Entre todos los parámetros cosmológicos  $\sigma_8$  es el más sensible a la información del espectro de potencia del SZE, un cambio del 40% en este parámetro se refleja en

incremento de un orden de magnitud en la amplitud del espectro de potencia, puede establecerse la dependencia  $C_l \propto \sigma_8^7$  donde  $C_l$  es la amplitud del espectro de potencia en la escala de  $l \simeq \pi/\theta$  siendo  $\theta$  el tamaño angular en radianes.



**Figura 2.6:** (a) Espectros de potencia de las anisotropías secundarias del CMB comparados con el espectro de potencia de las anisotropías primarias (Tomado de [2]). Nótese que las anisotropías secundarias dominan a escalas angulares del orden de arco minutos correspondientes a multipolos  $l \sim 10^4$ . (b) Variación del espectro de potencia con respecto a los cambios en el parámetro de normalización del espectro del CMB  $\sigma_8$  (Tomado de [30]). Nótese que el cambio  $\sigma_8$  en un factor de 1.5 genera una variación de más de un orden de magnitud en la potencia del espectro.

Experimentalmente medir el espectro de potencia del SZE es más fácil que la determinación de propiedades físicas de cúmulos individuales debido a que las observaciones con poca señal a ruido contribuyen para incrementar la confiabilidad en la determinación del mismo [30].

### 2.3.5. Ecuación de estado de la energía oscura

El campo de velocidad de los cúmulos de galaxias provee de un trazador de la formación y evolución de la estructura a gran escala del universo, de la misma forma constituye un método para sondear las propiedades de la energía oscura, en particular, establecer restricciones a la ecuación de estado de la misma.

Bhattacharya y Kosowsky [6] utilizaron modelos de la distribución de velocidad peculiar para halos de materia oscura y simulaciones numéricas del consorcio VIRGO para generar medidas estadísticas del campo de velocidad. Concluyen que al emplear una muestra de miles de cúmulos de galaxias para determinar el campo de velocidad mediante el kSZE, errores en la velocidad peculiar en cada cúmulo hasta del orden de

$1000\text{km s}^{-1}$  permiten mejorar las restricciones a una ecuación de estado de la energía oscura de la forma  $w(z) = w_0 + w_a z / (1 + z)$  hasta en un factor dos.

Los efectos sistemáticos en la determinación del campo de velocidad han sido analizado por los mismos autores [7], determinan que el error en la determinación de la temperatura del ICM introduce errores del orden de los errores estadísticos en la determinación de la velocidad peculiar.

# Capítulo 3

## Diseño experimental

### 3.1. Objetivo

El objetivo de este trabajo es la extracción de las propiedades físicas de cúmulos de galaxias utilizando las observaciones del efecto Sunyaev-Zel'dovich, a través del análisis de observaciones en la región milimétrica del espectro electromagnético con resolución superior a la de experimentos como ACT y SPT ( $\sim 1'$ ). Derivando en una mejor comprensión de los efectos sistemáticos que surgen en este tipo de observaciones, aplicando posteriormente el conocimiento adquirido en el diseño y realización de un estudio que permita mejorar las restricciones en los parámetros cosmológicos utilizando el Gran Telescopio Milimétrico (GTM) [53].

### 3.2. Estado de las observaciones del SZE

El SZE tiene un gran potencial en la determinación de las propiedades de la estructura a gran escala, sin embargo, en la práctica la observación de este efecto está sujeta a varias restricciones, la primera de ellas es la sensibilidad necesaria para distinguir la fluctuación debida al cúmulo, en el caso de un cúmulo masivo el límite de detección puede encontrarse en forma aproximada como:

$$\Delta I = I_0 y_0 \simeq 2.28 \text{mJy arcmin}^{-2} \quad (3.1)$$

$$\Delta T = T_0 y_0 \simeq 550 \mu K \quad (3.2)$$

para un cúmulo con parámetro de Compton  $y_0 \simeq 10^{-4}$ , en la práctica el ruido introducido en la observación debido a la atmósfera, el ruido instrumental y las fuentes de confusión incrementan la sensibilidad requerida.

### 3.2.1. Observaciones en radio

Los experimentos en longitud de onda de radio tienen la ventaja de observar un amplio contraste en la fluctuación medida en la temperatura de antena [13], así como de aprovechar la combinación de resolución y sensibilidad en las configuraciones compactas en arreglos interferométricos (las configuraciones de *baseline* mayor tienen menos sensibilidad a la emisión extendida).

Las primeras detecciones de cúmulos de galaxias fueron realizadas, a finales de la década de los setentas, en la región de Rayleigh-Jeans del espectro del CMB a través de radiotelescopios en la dirección de cúmulos previamente identificados (principalmente del catálogo de Abell [8, 18]) empleando el telescopio Owen Valley Radio Observatory (OVRO) de 40m.

Las técnicas observacionales y la sensibilidad de los instrumentos se incrementó con el tiempo propiciando el auge de las observaciones del SZE en la década de los noventas. La primera detección interferométrica se realizó empleando el arreglo interferométrico Ryle [27], publicada en 1993, ese año se publicó la detección del cúmulo de Coma [35] usando el radiotelescopio de 5.5m instalado en OVRO.

La cantidad de telescopios e instrumentos se incrementó con gran velocidad hacia finales de la década, incorporando mediciones en frecuencias mayores. El cúmulo RXJ1347-1145 fue detectado por el telescopio de 45m en Nobeyama en las bandas 21, 43, 150GHz [30]. Los interferómetros BIMA y OVRO realizaron observaciones de 60 cúmulos de galaxias a 30GHz [14]. CBI (Cosmic Background Imager) detectó Abell 478 con una alta “resolución espectral” realizando diez mediciones en el intervalo entre 26GHz y 36GHz con una resolución de 1GHz[60].

El principal resultado científico de estas observaciones consiste en la primera determinación de la constante de Hubble en forma independiente a la escala de distancia. Mediante una muestra de 41 cúmulos de galaxias recolectada de varios experimentos se determinó un valor de  $H_0 = 61 \pm 3 \pm 18 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  [46].

Las observaciones en radio están limitadas a realizar observaciones en la región del decremento del SZE. Como consecuencia, no se puede explotar la firma espectral única del efecto Sunyaev-Zel’dovich. El separar la contribución del efecto cinemático en las observaciones y realizar “detecciones ciegas” de cúmulos de galaxias a  $z > 1$  es virtualmente imposible sin la información del incremento y del nulo.

### 3.2.2. Experimentos en milimétrico

Aunque las observaciones en radio poseen en la actualidad una mayor resolución espacial con respecto a las observaciones en el milimétrico, la mayor cantidad de información que puede usarse para la “detección ciega” de cúmulos de galaxias se encuentra en la región milimétrica del espectro electromagnético.

Con el objetivo de aprovechar la capacidad del SZE para generar muestras de cúmu-



los limitadas en masa se han diseñado un conjunto de experimentos para entender las características reales de las observaciones en longitud de onda milimétrica.

La desventaja de estas observaciones radica en su susceptibilidad a las condiciones atmosféricas en las que se realicen. Las fluctuaciones en el vapor de agua modifican la capacidad de transmisión de la radiación milimétrica a través de la atmósfera, por lo que estas observaciones se realizan en sitios con poca humedad. Los instrumentos, por su parte, deben de contar con un gran rango dinámico debido a que la emisión de la atmósfera representa un brillo cinco órdenes de magnitud mayor al de las fuentes observables [55].

Algunos de los experimentos que han realizado observaciones del efecto Sunyaev-Zel'dovich son:

**SuZIE** (Sunyaev-Zel'dovich Infra-red Imager Experiment) [23] fue uno de los primeros experimentos específicamente diseñados para detectar el SZE mediante observaciones multi-frecuencia con una resolución  $\theta \simeq 5'$  instalado en el Caltech Submillimeter Observatory (CSO) en Mauna Kea. Incluso reportó límites en la velocidad peculiar de algunos cúmulos de Abell utilizando el efecto cinemático [5]. SuZIE ha recibido dos actualizaciones (conocidas como SUZIE II y SuZIE III). SuZIE III tendrá la capacidad de tomar mapas de  $4' \times 6'$  en las bandas 50, 220, 280 y 350 GHz en forma simultánea.

**ACBAR** (Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver) [50] Consiste en un arreglo de 16 bolómetros de nitruro de silicio instalado en el telescopio VIPER en la Antártida. Realizó observaciones en cuatro bandas 350, 275, 220 y 150 GHz con una resolución aproximada de  $4 - 5'$ . Fue diseñado para restringir las fluctuaciones en el CMB en escalas de minutos de arco y realizar observaciones del SZE en cúmulos conocidos (Figura 3.4(a)).

**SCUBA** (Submillimeter Common-User Bolometer Array) [22] Uno de los instrumentos submilimétricos del JCMT [62] capaz de realizar observaciones en dos longitudes de onda  $850\mu\text{m}$  y  $450\mu\text{m}$  mediante arreglos de bolómetros de 37 y 91 píxeles respectivamente en forma simultánea mediante un separador dicróico. SCUBA tiene la ventaja de realizar observaciones en el máximo del incremento de SZE. En [70] se muestra un análisis a observaciones de SCUBA de 40 cúmulos de galaxias encontrando evidencia de la presencia de este efecto en 17 cúmulos de su muestra, destacando la importancia de construir instrumentos como SCUBA-2 para disminuir los efectos negativos que se introducen debido a variaciones atmosféricas.

#### Experimentos Actuales

**APEX** (Atacama Pathfinder EXperiment) El telescopio de 12m construido como prototipo de antena para el arreglo interferométrico ALMA (Atacama Large Millimeter Array) [68]. Los instrumentos instalados en su cabina Cassegrain son LABOCA y APEX-SZ. LABOCA (Large Bolometer Camera) [56] es una cámara de continuo, utiliza un arreglo de 295 bolómetros observando en la ventana atmosférica de  $0.87\text{mm}$ , el incremento del SZE. APEX-SZ es instrumento “piloto” que experimenta con nuevas

tecnologías en la instrumentación dedicada al efecto Sunyaev-Zel'dovich [54]. APEX-SZ consiste en un arreglo 300 de bolómetros TES (*Transition Edge Sensors*) con un tamaño del campo de  $24'$  y electrónica de lectura multiplexada mediante *SQUIDS*, realiza observaciones del decremento del SZE a 2mm. APEX-SZ ha realizado observaciones de 1E0657-56 (conocido como Bullet Cluster, Figura 3.4(b)) encontrando un decremento de  $-771 \pm 71 \mu\text{K}_{\text{CMB}}$  suponiendo un modelo  $\beta$  [19] sin encontrar evidencia de la subestructura observada en rayos-X. Ambos instrumentos realizaron observaciones de Abell 2163 [38], la estimación de masa empleando el SZE para este cúmulo es consistente con los resultados derivados de observaciones en rayos-X y weak lensing.

**ACT** (Atacama Cosmology Telescope) [31] Un experimento diseñado para maximizar la sensibilidad en las detecciones de SZE, consiste un telescopio de 6m con el secundario fuera de eje (evita la contaminación del soporte del espejo secundario al patrón de antena). El instrumento en su plano focal MBAC tiene la capacidad de realizar observaciones en tres longitudes de onda 2.1, 1.4, 1.1mm en forma simultánea mediante 1024 bolómetros TES en cada banda de observación con una resolución del orden de  $1' - 2'$ . El objetivo de ACT es realizar búsquedas de cúmulos de galaxias en un área de  $\sim 100\text{deg}^2$  con un umbral mínimo de masa  $\sim 2 \times 10^{14} M_{\odot}$  tomando ventaja de una sensibilidad de  $2\mu\text{K}$  en un píxel de  $1.7' \times 1.7'$ . La estrategia de observación emplea observaciones a elevación constante minimizando así los efectos de la atmósfera. Se espera que al final del periodo de observación ACT provea una muestra con cientos de cúmulos de galaxias.

**SPT** (South Pole Telescope)[49] Al igual que ACT es un telescopio con el secundario fuera de eje, en este caso el espejo primario es de 10m, el instrumento en el plano focal consta de 6 sub-arreglos de 160 bolómetros dando un total de 960 bolómetros, cada sub-arreglo esta diseñado para observar en un canal de las cinco bandas centradas en 3.1, 2.0, 1.4, 1.1, 0.87mm. SPT realizará búsquedas de cúmulos de galaxias en un área de  $\sim 4000\text{deg}^2$ . Las predicciones realizadas para la cantidad de cúmulos detectados por este experimento son del orden de miles. Los primeros cúmulos detectados por SPT fueron encontrados mediante una búsqueda en  $\sim 40\text{deg}^2$  empleando observaciones a 3.1, 2.0, 1.4mm. Estas detecciones consisten en un cúmulo previamente identificado en rayos-X, dos cúmulos con posibles contrapartes en rayos-X y una “detección ciega”[57].

**Planck** Es un satélite en órbita alrededor de L2 (El segundo punto de Lagrange en el sistema tierra-sol) diseñado para realizar observaciones milimétricas de todo el cielo. El objetivo de Planck es determinar las propiedades de las anisotropías del CMB en escalas de minutos de arco y de cúmulos galaxias; cuenta con espejo primario de 1.5m en diámetro, un instrumento de alta frecuencia (HFI) observando mediante cinco arreglos de bolómetros con bandas centradas en 3.0, 2.0, 1.4, 0.85, 0.55 mm de 4, 12, 12, 6, 8, 6 píxeles respectivamente y un instrumento de baja frecuencia (LFI) constituido por cuatro arreglo de radio receptores con bandas centradas en 10, 6.8, 4.3, 3.0 mm de 4, 6, 12, 34 detectores respectivamente. El valor esperado de sensibilidad en las observaciones de Planck es  $\sim 2\mu\text{K}$ , entrará en operación a mediados de 2009 con la

ventaja de realizar sus observaciones fuera de la atmósfera terrestre evitando así la contribución de la emisión atmosférica.

### 3.3. Observaciones con AzTEC

AzTEC (Aztronomical Thermal Emission Camera [65]) es una cámara milimétrica que cuenta con 144 bolómetros de nitruro de silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Fue diseñada como el instrumento de primera luz para el Gran Telescopio Milimétrico (GTM), tiene la capacidad de realizar observaciones del continuo milimétrico en tres bandas  $\lambda = 1.1, 1.4, 2.1$  mm [66] (una sola banda por periodo de observación).

Antes de ser instalada en el GTM será ajustada para realizar observaciones de alta resolución espacial en cúmulos de galaxias mediante el SZE. AzTEC fue probado durante dos temporadas en el 2005 como instrumento invitado en el James Clark Maxwell Telescope (JCMT) demostrando su capacidad para realizar observaciones de galaxias submilimétricas (SMG) con una sensibilidad de  $\sigma \sim 1\text{mJy}$  a  $z > 1$ .

#### 3.3.1. AzTEC Cluster Evolution Survey (ACES)

Los escenarios de formación de los cúmulos de galaxias más masivos, predicen la formación de las galaxias elípticas (denominadas galaxias cD) en los pozos de potencial mediante un brote violento de formación estelar. El AzTEC Cluster Evolution Survey (ACES) es un proyecto dedicado a delimitar el escenario de la formación de estructura a gran escala utilizando como marcador los objetos masivos que se conocen en el universo cercano: los cúmulos de galaxias y en el universo lejano: las radio-galaxias de alto *redshift* (HzRG por sus siglas en inglés).

Durante la temporada de observación de AzTEC como instrumento invitado en el Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE) [15] en el segundo semestre de 2007 y 2008, AzTEC ha recolectado observaciones de una muestra de cúmulos de galaxias y HzRG para el proyecto ACES con una resolución  $\theta_{\text{FWHM}} \simeq 30''$ .

La muestra se ha dividido en cinco intervalos de *redshift* para su análisis, los cúmulos de galaxias ocupan los intervalos con  $z < 1.5$  y las HZRG ocupan los intervalos con  $z > 1.5$ . AzTEC realizó observaciones en la banda centrada en  $\lambda = 1.1\text{mm}$  en campos de  $\sim 12' \times 12'$  alrededor de cúmulos de galaxias previamente identificados.

#### 3.3.2. Muestra de cúmulos

Los cúmulos de galaxias incluidos en ACES (Tabla 3.2) han sido seleccionados a partir de catálogos de cúmulos masivos ( $M > 10^{14}M_{\odot}$ ) detectados en óptico, NIR y rayos-X, con el objetivo de realizar estudios del SZE el proceso de selección incluyó cúmulos con observaciones en otras longitudes de onda dentro de las ventanas

milimétricas de la atmósfera.

La profundidad promedio que se alcanza en los mapas de AzTEC después de 30 horas de integración es  $\sigma \simeq 0.7 \text{mJy haz}^{-1}$  utilizando el método de reducción mediante análisis de componentes principales (véase sección 4.1.1).

Los cúmulos MACSJ0025.4-1222, MACSJ0454.1-0300 y MACSJ2129.4-0741 fueron seleccionados ya que el instrumento BOLOCAM realizó observaciones de estos cúmulos durante 2007. Actualmente el grupo de cosmología milimétrica del INAOE trabaja para establecer una colaboración con el equipo de dicho instrumento para ampliar la cantidad de cúmulos con observaciones de ambos instrumentos.

Los cúmulos seleccionados del Southern Cosmology Survey (SCS) han sido identificados mediante fotometría en las bandas *griz* basándose en el Blanco Cosmology Survey (BCS), utilizando el telescopio de 4 metros en Cerro Tololo, los cúmulos detectados se encuentran dentro de la región de observación de ACT, SPT y APEX.

Las observaciones cubren dos regiones de  $\sim 50 \text{deg}^2$  centradas alrededor de  $\alpha_1 \simeq 5\text{h}30\text{m} \delta_1 \simeq -52^\circ 47\text{m}$  y  $\alpha_2 \simeq 23\text{h}00\text{m}, \delta_2 \simeq -55^\circ 12\text{m}$ [34]. Los campos del SCS fueron seleccionados en base a regiones con poca presencia de polvo galáctico (véase Figura 3.3.2) para evitar efectos de atenuación en observaciones en el óptico y de confusión las observaciones (sub)milimétricas. estos cúmulos cuentan con estimados de *redshift* mediante técnicas fotométricas.

Los cúmulos tomados de los catálogos del *Reflex Galaxy Cluster Survey* (RXC) [10], *XMM Large Scale Structure Survey* (XMMLSS) [41] y del *XMM Galaxy Cluster Survey* (XMM) [47] y del catálogo de Abell fueron seleccionados en función a su masa inferida a través de su luminosidad en rayos-X o de su velocidad de dispersión de sus galaxias miembro.

## 3.4. Fuentes de contaminación y confusión

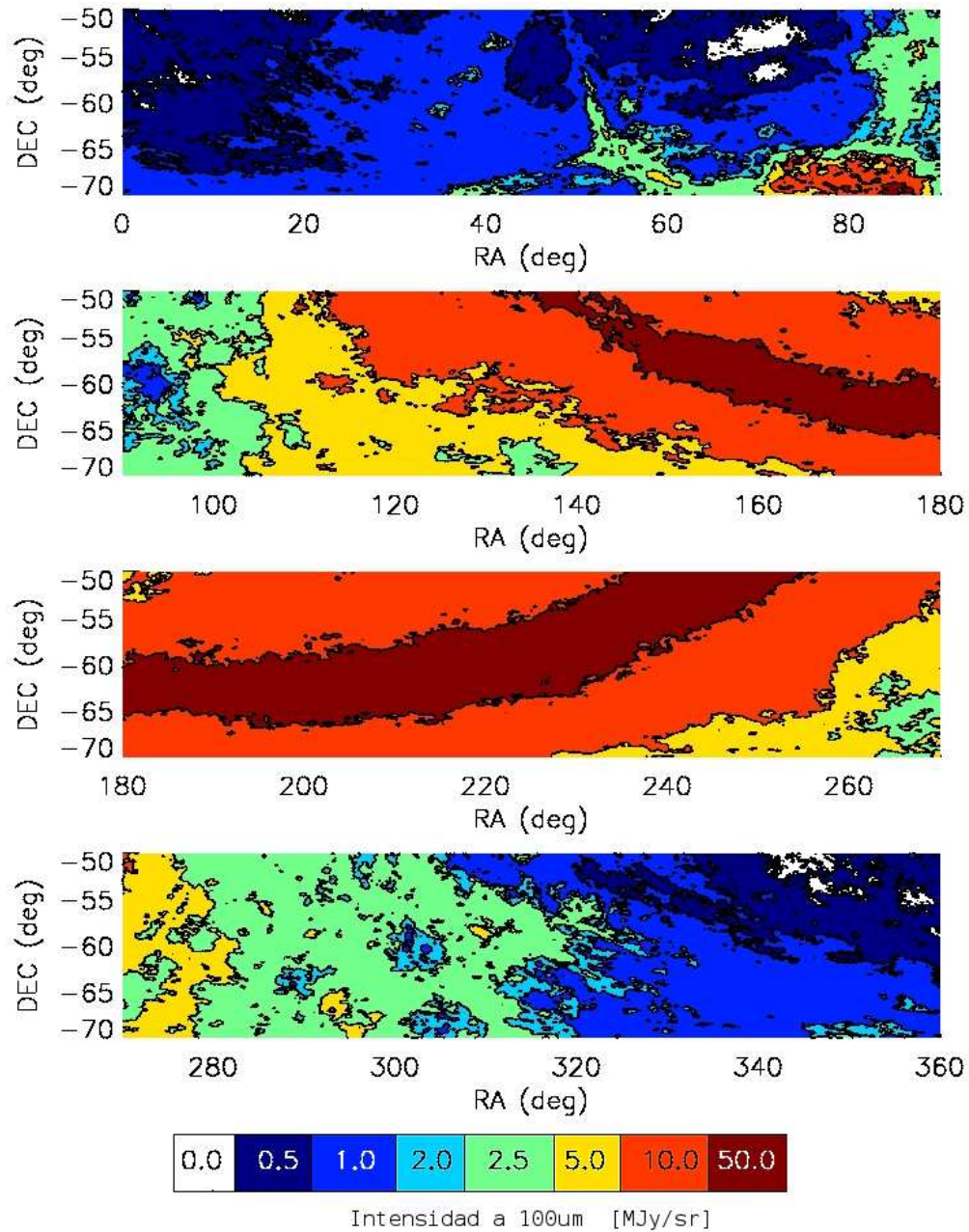
### 3.4.1. Fuentes de radio

Las primeras detecciones del SZE se realizaron en el radio, por lo tanto, la primera población que se supuso podría contaminar la señal del SZE fueron las fuentes de radio. Para los cúmulos de galaxias existe una correlación con la presencia de este tipo de fuentes en la cual destacan las galaxias centrales (o galaxias cD).

Estos objetos pueden contar con un núcleo activo o AGN y expulsar chorros de gas con un espectro de radiación sincrotrón  $S \propto \nu^{-\alpha}$ , donde  $S$  es el flujo de la fuente,  $\nu$  la frecuencia y  $\alpha$  es el índice espectral. Aunque el índice espectral no es común entre diferentes fuentes suele tomarse valores cercanos a  $\alpha \simeq 0.7$ .

La galaxia central y las fuentes pertenecientes al cúmulo alteran la medición del SZE generando una subestimación del flujo del mismo, sin embargo, debido a la dependencia en frecuencia como una ley de potencia esta contaminación suele despreciarse a

### 3.4. Fuentes de contaminación y confusión



**Figura 3.1:** Mapa de la emisión galáctica de polvo a  $100\mu\text{m}$  realizado en base a observaciones de COBE y IRAS [52] para un barrido a elevación constante de ACT centrado en  $\delta = -60^\circ$ . Los estudios extragalácticos (sub)milimétricos se realizan en regiones donde la emisión de polvo es  $I_{100\mu\text{m}} < 1\text{MJy sr}^{-1}$  (las regiones en azul oscuro y blanco en el mapa). Nótese que las observaciones del BCS se realizan en las regiones con menor presencia de polvo (regiones en blanco). En los paneles centrales se observa el máximo en la emisión del polvo debido al plano de la Vía Láctea.

$\nu > 30\text{GHz}$  [13], por lo que en estudios en las bandas milimétricas se ignora este tipo de población.

### 3.4.2. Galaxias submilimétricas

La población de galaxias submilimétricas es la principal fuente de contaminación en nuestras observaciones, al igual que las fuentes con emisión en radio, generan un flujo adicional al SZE, generan una subestimación del efecto en longitudes de onda  $\lambda > 1.4\text{mm}$  y una sobre-estimación a longitudes de onda  $\lambda < 1.4\text{mm}$ .

La emisión térmica de las galaxias submilimétricas tiene una dependencia espectral distinta  $F \propto \nu^{2+\beta}$  a la del SZE por lo que es posible separar la contribución de las mismas. Sin embargo, en la práctica se requiere de una combinación de observaciones con alta resolución y amplia cobertura espectral para lograrlo.

Podemos estimar la contaminación debido a las SMG utilizando la densidad superficial de fuentes milimétricas a  $\lambda = 1.1\text{mm}$ , la cual predice  $\sim 100$  fuentes con un flujo mayor a  $3\text{mJy}$  en un campo de  $1\text{deg}^2$  (Figura 3.2).

En los campos observados por ACES esperamos alrededor de 8 fuentes con un flujo superior a  $3\text{mJy}$  (o  $S/N \gtrsim 3$ ). Sin embargo, este valor solo es un límite inferior ya que los cúmulos son regiones con una densidad mayor comparado con los campos sin sesgo empleados en la determinación del número de cuentas.

El segundo factor que debemos considerar como contaminante al realizar observaciones de cúmulos de galaxias es el efecto de lente gravitacional. El flujo de las fuentes débiles detrás del cúmulo y en la línea de visión del observador es modificado debido a la deformación del espacio tiempo que generan estas estructuras masivas. La magnitud de este efecto depende de la forma del potencial gravitacional y la posición de la fuente con respecto al cúmulo.

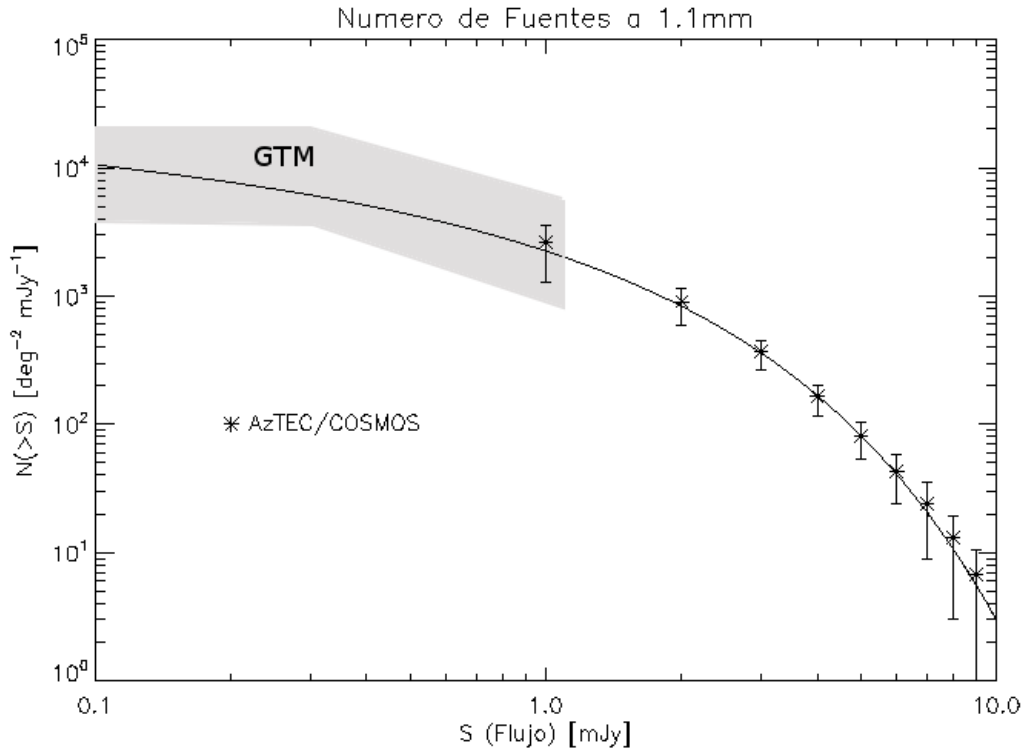
#### Efecto de la resolución

Los experimentos como ACT y SPT aprovechan la alta sensibilidad y eficiencia casi constante de un haz  $\sim 1'$  en la detección del SZE. Sin embargo, estas observaciones pueden integrar una o varias fuentes milimétricas dentro de un solo haz. Un ejemplo claro surge comparando las observaciones de AzTEC@JCMT realizadas a una resolución de  $\sim 18''$  con las observaciones de AzTEC@ASTE a una resolución de  $\sim 30''$ .

La Figura 3.3 muestra dos mapas centrados en el cúmulo de galaxias MACSJ045.1-0300 a  $z = 0.55$ , en el panel superior se observa la presencia de cuatro fuentes milimétricas en esta zona y la ausencia de emisión extendida del ICM; en el panel inferior se observa una emisión extendida aparente formada por la contribución de tres fuentes y probablemente una emisión subyacente debida al medio intracúmulo.

Este análisis simple coloca en evidencia dos aspectos importantes en relación con la confiabilidad de realizar observaciones del SZE con resoluciones del orden de  $1'$

### 3.4. Fuentes de contaminación y confusión



**Figura 3.2:** Densidad superficial de fuentes milimétricas a  $\lambda = 1.1\text{mm}$  modelada con una ligera modificación al perfil de Schechter. Los parámetros del perfil fueron tomados del mejor ajuste realizado a las observaciones de AzTEC sobre el campo COSMOS (Cosmic Evolution Survey). Para más detalles véase [4]. Nótese la ausencia de mediciones por debajo de  $S = 1\text{mJy}$  debido a que este flujo corresponde al límite de confusión de las observaciones de AzTEC. El GTM tiene un límite de confusión  $\sim 0.1\text{mJy}$  por lo que se obtendrán restricciones a la densidad superficial de fuentes milimétricas dentro del intervalo  $S = 0.1 - 1.0\text{mJy}$ .

1. Observaciones del efecto Sunyaev-Zel'dovich con esta resolución (o menor) tienen la ventaja de alcanzar una mayor sensibilidad y una mayor eficiencia. Sin embargo, conforme al incremento en el tamaño del haz aumenta la posibilidad de tener un mayor número de fuentes puntuales contaminando estas observaciones.
2. Estimar las contribuciones de las fuentes puntuales requiere de observaciones con una mayor resolución con el propósito de resolver múltiples fuentes que contaminen las observaciones del SZE con un tamaño de haz del orden de  $\sim 1'$ . La presencia de fuentes puntuales puede inferirse mediante observaciones con una mayor resolución en el milimétrico (un ejemplo son las observaciones que se realizarán con el GTM) o con observaciones en el cercano infrarrojo y un modelo de la SED de cada fuente.

### 3.4.3. Fluctuaciones primordiales del CMB

Las fluctuaciones primordiales del CMB son fuentes de confusión y de errores sistemáticos en las observaciones del CMB ya que constituyen un fondo sobre el cual se observa la pequeña fluctuación del SZE, el efecto es considerable cuando la potencia de las fluctuaciones del CMB es comparable de la potencia en la fluctuación del SZE.

A grandes escalas las fluctuaciones del CMB tienen una mayor potencia comparadas con las del SZE, ambas fluctuaciones tienen el mismo nivel de potencia en multipolos  $l \sim 3000$  (Figura 2.6) lo que corresponde a un tamaño angular  $\theta \sim 4'$ . A escalas más pequeñas la potencia del CMB decrece rápidamente por lo que a tamaños angulares típicos de cúmulos de galaxias lejanos  $\theta_c \simeq 1'$  ( $l \simeq 10000$ ) la potencia de las fluctuaciones debidas al SZE es tres órdenes de magnitud mayor a la potencia en las fluctuaciones primordiales, lo cual permite despreciar la contribución de estas.

Podemos identificar dos casos en los cuales la contribución del CMB es importante:

1. Observaciones de cúmulos de galaxias cercanos, los cuales sostienen un diámetro angular mayor a  $\sim 4'$ .
2. Observaciones con resolución no mejor a  $\sim 4'$  como son las observaciones de SUZIE-I y ACBAR 3.4(a).

## 3.5. Consideraciones de diseño

El potencial de la herramienta que constituye el efecto Sunyaev-Zel'dovich se ve amedrentado por la gran cantidad de restricciones prácticas que interfieren en las observaciones. El diseño de experimentos debe de considerar.

**Sensibilidad** La sensibilidad instrumental y las técnicas de eliminación de la emisión de la atmósfera determinan el umbral de detección en masa alcanzable por el



### 3.5. Consideraciones de diseño

---

experimento. La sensibilidad, a la vez, repercute en la capacidad de separar el efecto cinemático del térmico, ya que el primero produce fluctuaciones un orden de magnitud menor con respecto al segundo.

**Resolución Espacial** Una mayor resolución angular permite identificar la presencia de fuentes puntuales en detecciones ciegas de cúmulos de galaxias. Disminuir o eliminar la contribución de estas fuentes reducirá los errores sistemáticos en la determinación de las propiedades inferidas a partir de observaciones del SZE.

**Resolución Espectral** Es el segundo requisito para separar el efecto térmico del cinemático, ya que observaciones en varias frecuencias permiten analizar el desplazamiento en intensidad inducido por el kSZE a la firma espectral del TSZE. La contaminación de las fuentes puntuales en las observaciones de baja frecuencia 2.0, 3.0mm puede estimarse a partir de dos o más mediciones de detecciones de fuentes resueltas en observaciones de alta frecuencia a 1.1, 0.85mm.

**Tamaño de la muestra** Muestras con cientos o miles de cúmulo de galaxias a  $z > 1$  permiten construir medidas estadísticas para la densidad espacial y la velocidad peculiar más confiables. Las mediciones estadísticas son más robustas ante errores sistemáticos en la determinación de parámetros cosmológicos.

**Simulaciones y Predicciones** Confrontar valores estimados en la magnitud del SZE en cúmulos conocidos y con los valores observados (véase Tabla 3.5) permitirá indagar el estado dinámico de los cúmulos de galaxias (presencia de subestructura, *mergers*), así como, establecer posibles errores sistemáticos introducidos por el proceso de reducción de datos. Las predicciones son útiles cuando se comparan datos entre diversos experimentos, a partir de las fuentes observadas y la magnitud de SZE detectado por AzTEC@ASTE se puede crear mapas sintéticos de las observaciones con ACT [37, 24] y SPT [28] en todas las bandas de estos experimentos.

**Datos multifrecuencia** Establecer estimaciones espectroscópicas o fotométricas del *redshift* de los cúmulos de galaxias detectados en búsquedas de cúmulos de galaxias es necesario para la construcción de las mediciones estadísticas de la densidad espacial y de velocidad peculiar.

Experimento	Telescopio	Bandas (GHz)	Resolución (arcmin)
SUZIE	CSO	50	$\simeq 5$
		220	
		280	
		350	
ACBAR	Viper	150	5
		220	4
		275	
		350	
SCUBA	JCMT	350	0.233
Bolocam	CSO	140	1
		270	0.5
AzTEC	ASTE	270	0.5
AzTEC	GTM	140	0.15
		220	0.13
		270	0.1
APEX-SZ	APEX	150	0.6
LaBoca	APEX	345	0.3
MBAC	ACT	140	1.7
		220	1.1
		270	0.93
SPT Focal Array	SPT	95	1.5
		150	1.0
		219	0.69
		274	0.56
		345	0.4
HFI	Planck	100	10.7
		143	8.0
		217	5.5
		353	5.0
		545	5.0

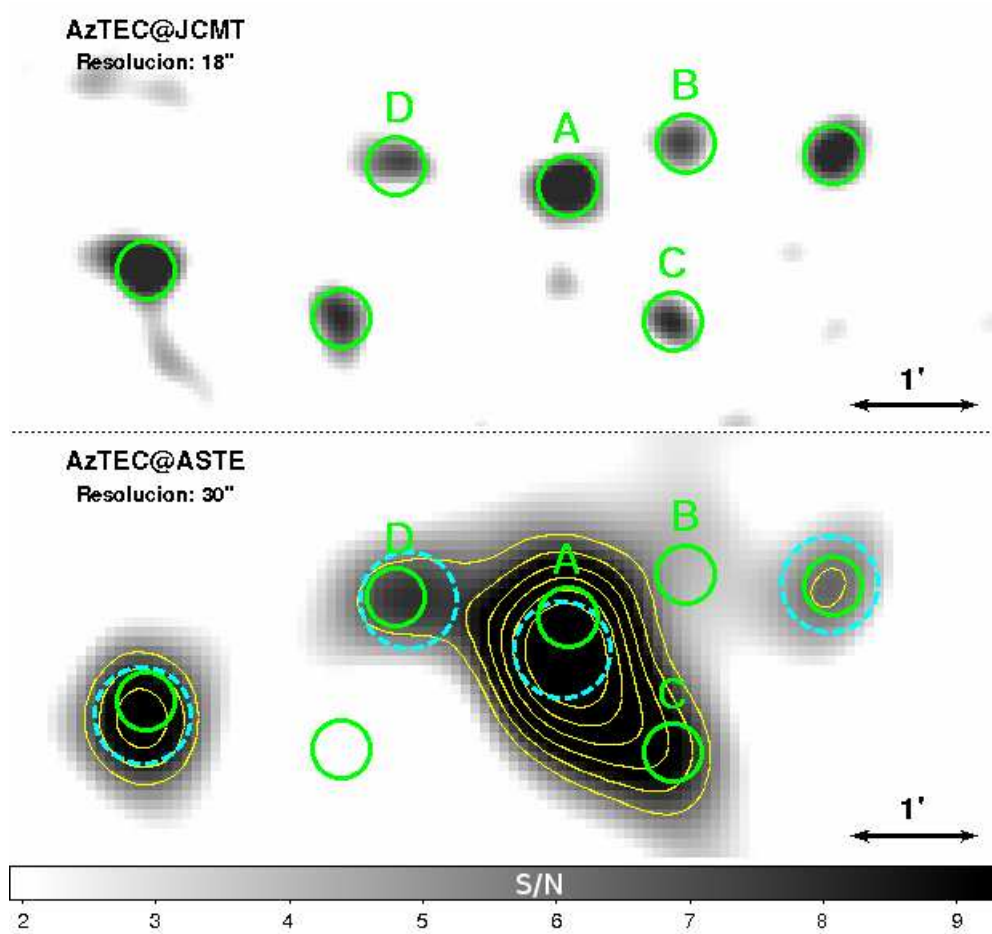
**Tabla 3.1:** Resumen de los instrumentos enfocados en la detección del efecto Sunyaev-Zel'dovich .

### 3.5. Consideraciones de diseño

**Tabla 3.2:** Muestra de cúmulos de galaxias del AzTEC Cluster Evolution Survey incluyendo los valores de temperatura electrónica determinada a partir de observaciones en rayos-X y los valores de masa publicados en la literatura

Nombre	Coords. Equatoriales (J2000)		z	Temp keV	Masa $10^{14} M_{\odot}$
	$\alpha$	$\delta$			
$0.5 < z < 1.5$					
XMMJ2215.9-1738	22:15:58.49	-17:38:03.00	1.4500	6.5 <sup>c</sup>	
XLSSJ0224-0325	02:24:03.89	-04:13:27.99	1.0500	4.1 <sup>f</sup>	
[VCB2006] 6	02:18:32.69	-05:01:04.00	0.8700		2.7 <sup>o</sup>
RXJ0152.7-1357	01:52:40.99	-13:57:45.00	0.8310	5.4 <sup>k</sup>	3.4 <sup>k</sup>
SCSOJ052805.3-525952.8	05:28:05.29	-52:59:52.79	0.6650		<1.1 <sup>e</sup>
CLJ0542.8-4100	05:42:50.09	-41:00:02.00	0.6340	5.45	
MACSJ0025.4-1222	00:25:29.80	-12:22:46.99	0.5840	9.4 <sup>d</sup>	
SCSOJ052114.5-510418.6	05:21:14.50	-51:04:18.59	0.5810		*
MACSJ2129.4-0741	21:29:25.99	-07:41:27.99	0.5700	8.1 <sup>d</sup>	2.8 <sup>d</sup>
XLSSJ0224-0348	02:24:09.00	-03:55:09.00	0.5570	3.4	
MACSJ0454.1-0300	04:54:10.90	-03:01:06.99	0.5500	7.5 <sup>d</sup>	3.8 <sup>a</sup>
CIG 0016+1609	00:18:33.29	16:26:35.99	0.5410	8.81 <sup>p</sup>	3.3 <sup>a</sup>
SCSOJ233556.8-560602.3	23:35:56.80	-56:06:02.30	0.5220		7.2 <sup>e</sup>
$z < 0.5$					
RXJ1347.5-1145	13:47:31.99	-11:45:42.00	0.4510	9.7 <sup>m</sup>	8.1 <sup>l</sup>
SCSOJ2334-5436	23:34:30.19	-54:36:47.49	0.3500		3.6 <sup>e</sup>
1ES0657-558	06:58:27.40	-55:56:47.00	0.2960	10.6 <sup>g</sup>	10.99 <sup>h</sup>
RXCJ051665-5430	05:16:25.60	-54:31:48.00	0.2950	7.5 <sup>g</sup>	6.4 <sup>g</sup>
RXCJ0117.8-5455	01:17:50.50	-54:55:26.00	0.2510		3.67 <sup>‡</sup>
AS0592	06:38:51.19	-53:57:47.00	0.2216		6.18 <sup>‡</sup>
A2163	16:15:34.09	-06:07:26.00	0.2030	14.7 <sup>k</sup>	5.5 <sup>b</sup>
A3404	06:45:32.89	-54:12:15.99	0.1670	7.6 <sup>g</sup>	6.6 <sup>g</sup>
A3395	06:27:31.09	-54:23:57.99	0.0506	5.1 <sup>k</sup>	6.7 <sup>k</sup>

<sup>a</sup> Bonamente et al (2008). <sup>b</sup> Bonamente et al (2009). <sup>c</sup> Stanford et al (2006). <sup>d</sup> Ebeling et al (2007).  
<sup>e</sup> Menanteau et al (2007). <sup>f</sup> Pacaud et al (2007). <sup>g</sup> Zhang et al (2006). <sup>h</sup> Zhang et al (2008). <sup>i</sup> Menanteau et al (2009). <sup>j</sup> Böhringer et al (2004). <sup>k</sup> Vikhlinin et al (2009). <sup>l</sup> Ota et al (2008). <sup>m</sup> Bradac et al (2008).  
<sup>n</sup> Willis et al (2005). <sup>o</sup> Van Breukelen et al (2009). <sup>p</sup> Solovyeva et al (2007) <sup>‡</sup> Calculado a partir de la luminosidad en rayos-X reportada en de Grandi et al (1999) y la relación  $L_x \propto M^{1.65}$  Rykoff et al (2008) tomando el valor de masa de RXCJ051665-5430 como referencia <sup>‡</sup> Calculado a partir de la luminosidad en rayos-X reportada en Böhringer et al (2004) y la relación  $L_x \propto M^{1.65}$ . Rykoff et al (2008) tomando el valor de masa de RXCJ0117 como referencia. \* Determinación de masa en progreso.

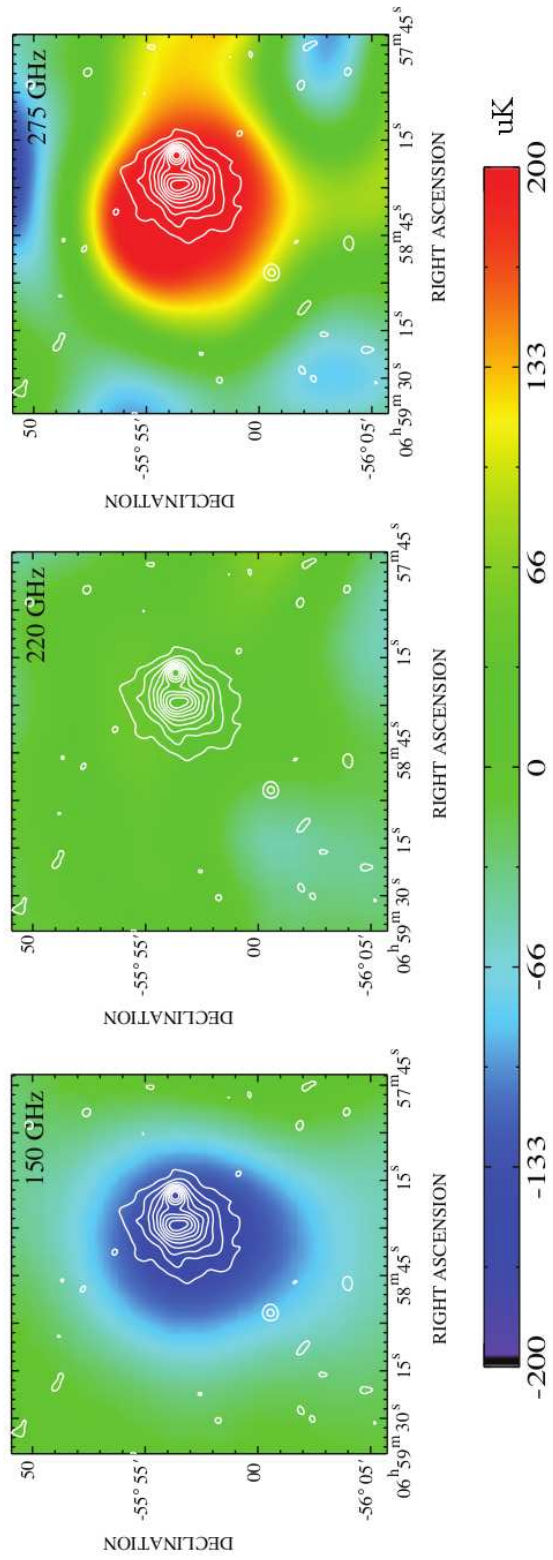


**Figura 3.3:** Arriba. Mapa de MACSJ045.1-0300 tomado con AzTEC en el JCMT a  $\lambda = 1.1\text{mm}$  y una resolución  $\theta \simeq 18''$  se presentan las fuentes detectadas (indicadas mediante círculos en color verde) con una señal a ruido mayor a 3, se encuentran cuatro fuentes en la parte central del mapa A, B, C y D, no se aprecia la emisión extendida del ICM. Abajo. Mapa de MACSJ045.1-0300 tomado con AzTEC en ASTE a  $\lambda = 1.1\text{mm}$  y una resolución  $\theta \simeq 30''$ , la posición de las fuentes detectadas en ASTE se indica mediante círculos en línea punteada, color cyan (El tamaño de los círculos corresponde al tamaño del haz de observación tanto para las fuentes detectadas en el JCMT como para las detectadas en ASTE) . Los contornos están espaciados dos unidades en relación señal a ruido a partir de  $S/N = 6$ , la pérdida en resolución se ve compensada por una mayor sensibilidad hacia la emisión extendida del SZE.

### 3.5. Consideraciones de diseño

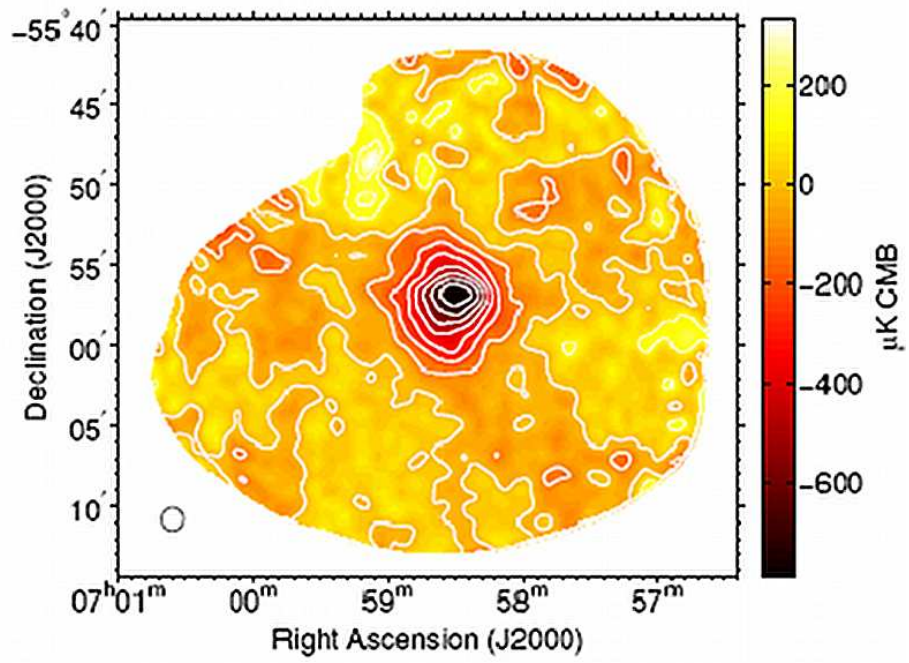
Nombre	Masa $10^{14} M_{\odot}$	$R_{200}$ Mpc	$y_0$ $10^{-4}$	$\Delta I$ mJy haz $^{-1}$
XMMJ2215.9-1738	1.54	0.64	1.30	2.19
RXJ0152.7-1357	1.81	0.85	0.72	1.20
CLJ0542.8-4100	2.18	0.98	0.66	1.11
MACSJ0025.4-1222	5.16	1.34	1.45	2.44
MACSJ2129.4-0741	4.19	1.25	1.15	1.94
XLSSJ0224-0348	1.15	0.82	0.31	0.52
MACSJ0454.1-0300	3.80	1.22	1.02	1.71
CIG0016+1609	4.88	1.34	1.29	2.17
RXJ1347.5-1145	6.17	1.50	1.43	2.41
1ES0657-558	8.35	1.76	1.54	2.59
RXCJ051665-5430	4.98	1.48	0.91	1.54
A2163	15.26	2.22	2.44	4.10
A3404	5.94	1.64	0.90	1.51
A3395	3.82	1.47	0.48	0.81

**Tabla 3.3:** Estimación de la masa  $M_{200}$  contenida dentro de  $R_{200}$  el radio en el cual la densidad de materia en el cúmulo es 200 veces la densidad crítica del universo, el parámetro de Compton central y de la magnitud de la fluctuación debida al SZE en una observación con AzTEC@ASTE a  $\lambda = 1.1\text{mm}$  con un tamaño de haz  $\theta = 30''$ ; este cálculo se realizó mediante el método descrito en [28].

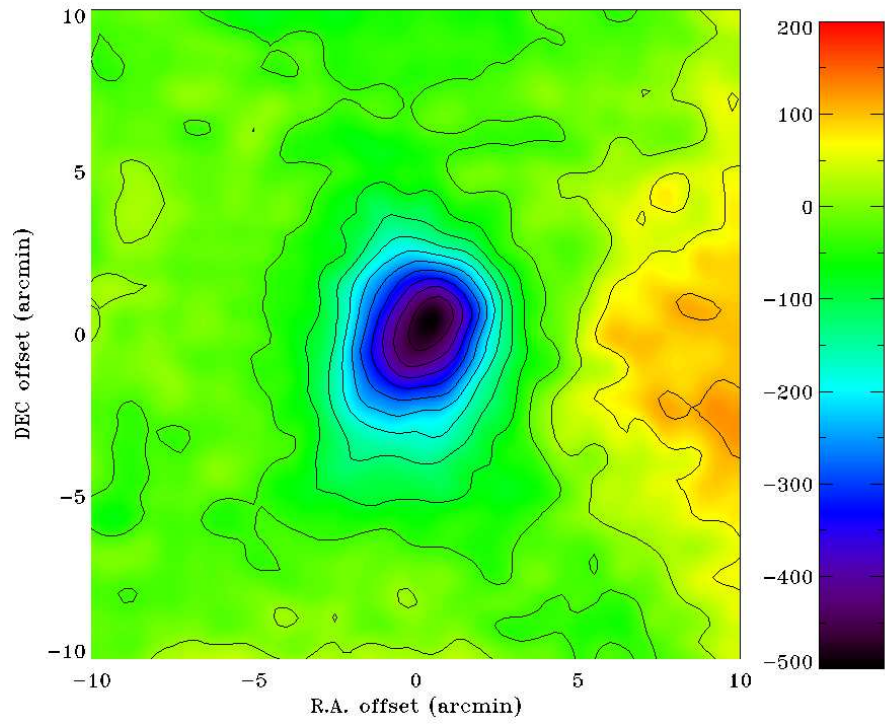


(a) ACBAR

### 3.5. Consideraciones de diseño

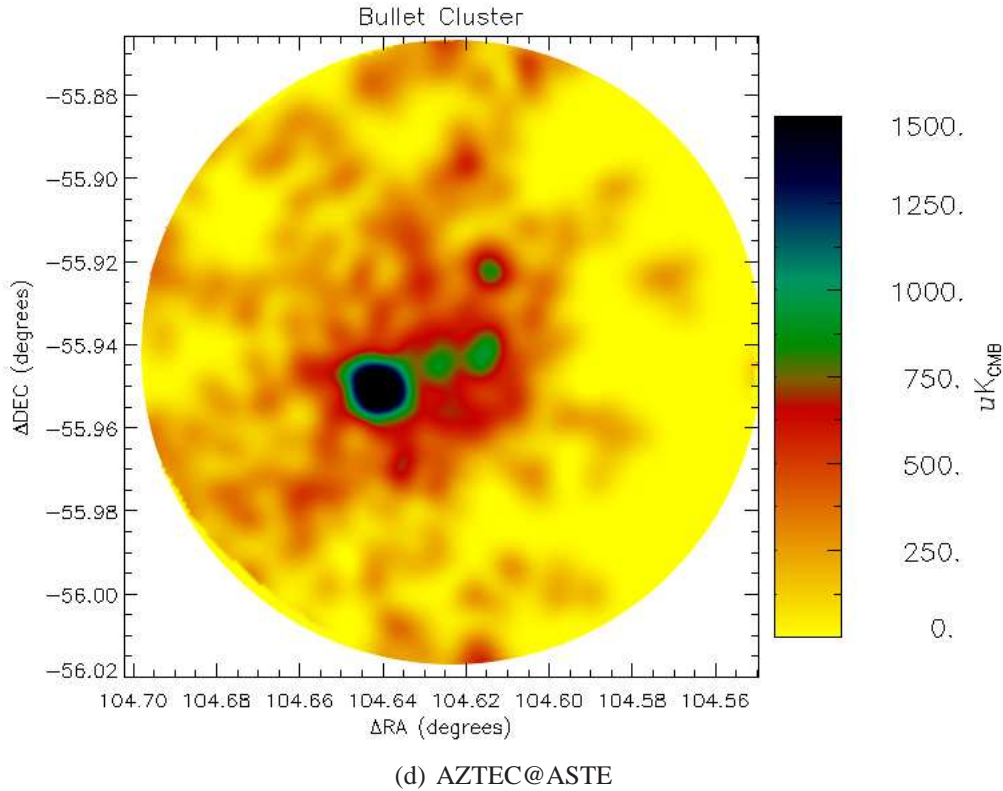


(b) APEX-SZ



(c) SPT





**Figura 3.4:** Mapas de observaciones milimétricas del SZE sobre el cúmulo de galaxias 1E 0657-56( conocido como el **Bullet Cluster** por su morfología y alta luminosidad en rayos-X) con diferentes experimentos. (a) Mapas construidos por ACBAR en el decremento, nulo e incremento con una resolución de 4.5' (Tomado de [9]). Los contornos de color blanco provienen de observaciones de ROSAT. (b) Observación del decremento realizada por APEX-SZ a 2.0mm(Tomado de [19] ). El círculo en la parte inferior izquierda representa el tamaño del haz de observación  $\theta = 1.4'$ , este mapa fue suavizado con un filtro gaussiano de 1'. (c) Detección de SPT a 2.0mm (Tomado de [17] )(d) Mapa preliminar de AzTEC@ASTE a 1.1mm con una resolución de 30", destaca (tres en color verde y una en negro) la presencia de cuatro fuentes puntuales alrededor del centro del cúmulo. La fuente más brillante es una galaxia submilimétrica a  $z = 2.7 \pm 0.2$  amplificada por el efecto de lente gravitacional [67]. Las fuentes puntuales se observan sobre la emisión extendida del SZ  $\Delta T/T_{CMB} \simeq 600\mu\text{K}$ .



# Capítulo 4

## Trabajo Futuro

### 4.1. Metas a corto plazo

#### 4.1.1. Reducción de observaciones tomadas con AzTEC@ASTE

En las observaciones milimétricas un elemento clave es entender la señal de emisión de la atmósfera, con el objetivo de sustraer su contribución a la señal captada por los detectores. Es así que se han creado diferentes metodologías con el propósito de eliminar dicha contribución. En el caso de AzTEC el *pipeline* de reducción está optimizado para la detección de las galaxias submilimétricas (SMG), que aparecen como fuentes puntuales en los mapas, utilizando el análisis de componentes principales (PCA). El PCA permite remover las señales altamente correlacionadas entre bolómetros, es de esperar que la señal debida a la atmósfera esté altamente correlacionada, en contraste, con la señal de las fuentes puntuales y el ruido instrumental.

La implantación de la técnica PCA en el *pipeline* de reducción de datos de AzTEC se desarrolló en el lenguaje de programación IDL, una visión resumida de este proceso consiste en crear la matriz de correlación de las señales de los bolómetros en el tiempo. El paso siguiente es encontrar los eigenvalores y eigenvectores de esta matriz. La limpieza de la observación se alcanza eliminando los eigenvectores con eigenvalores mayores a un valor de umbral determinado empíricamente. El proceso se repite hasta que no existan eigenvectores con eigenvalores mayores al valor de umbral.

El PCA es un método no lineal por lo tanto al aplicar esta técnica se tiene la desventaja de que actúa en forma diferente para cada observación, por esto, se introduce en la observación una fuente ficticia extremadamente brillante (1Jy) y se somete al proceso de reducción. El resultado es un mapa de la función de transferencia que incluye las contribuciones de la respuesta instrumental y del proceso de reducción. La función de transferencia es empleada para corregir los efectos sistemáticos introducidos por la reducción (mediante un proceso de deconvolución).

Una desventaja adicional se presenta en las observaciones del SZE, la detección

de la emisión extendida en observaciones con escalas angulares  $\theta \gtrsim 1'$ , se encuentra correlacionada en cierto grado en las mediciones de los bolómetros, esto implica, que el PCA disminuirá o removerá completamente esta señal de los mapas realizados.

La creación de los mapas es el proceso mediante el cual se convierte las mediciones de los bolómetros en una imagen calibrada en posición y en flujo de las fuentes astronómicas observadas con una estimación de las propiedades del ruido presentes en dicha observación. El proceso consiste en la creación de una gradilla en coordenadas ecuatoriales con una resolución de  $3'' - 6''$ . Los valores de las series de tiempo se organizan en un histograma espacial determinado por las propiedades de dicha gradilla. En este punto, las diferentes observaciones de un mismo objeto son cosumadas y convolucionadas con el kernel.

El siguiente paso es analizar las propiedades del ruido del mapa creado, valiéndose de simulaciones. Empleando la técnica de “jack knife”, se obtienen los mapas de ruido para cada observación, los cuales son cosumados en forma similar a las observaciones reales. Este paso permite crear un filtro de Wiener optimizado para recuperar la señal de las fuentes astronómicas (para una descripción más detallada de este proceso véase [55]).

#### 4.1.2. Reducción orientada a la emisión extendida

El equipo del instrumento AzTEC ha desarrollado un procedimiento experimental para recuperar la emisión extendida en observaciones que han sido reducidas empleando la técnica de PCA, denominado Fruit; se basa en realizar un estimador de la señal residual de la forma:

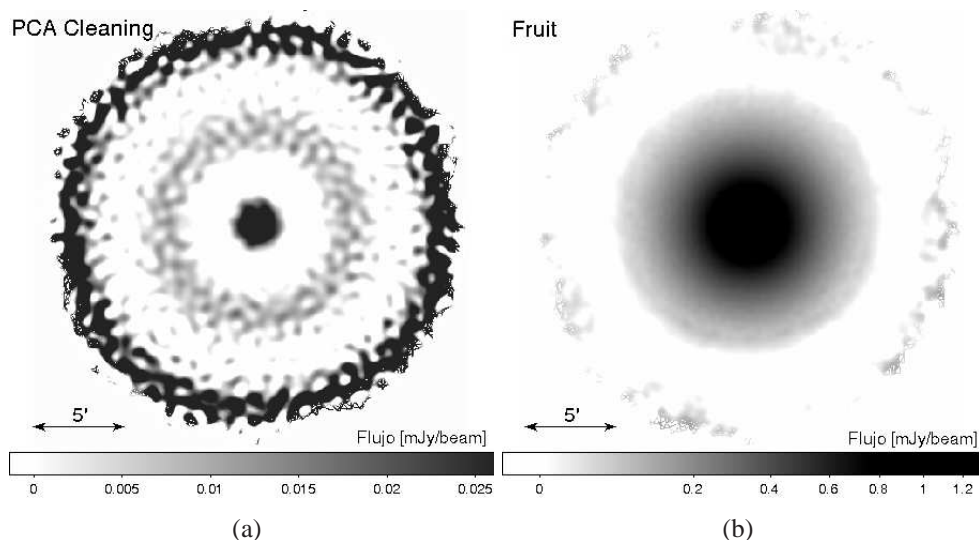
$$R = S - S_{PCA} \quad (4.1)$$

donde  $S$  es la señal original tomada de la serie de tiempo de los bolómetros,  $S_{PCA}$  es la señal reducida mediante PCA;  $R$  integra tanto la señal de la emisión de la atmósfera y la emisión extendida de las fuentes astronómicas, se crea una estimación de la señal real mediante:

$$S' = S + R_{PCA} \quad (4.2)$$

donde  $R_{PCA}$  se obtiene al aplicar el PCA al resultado de la ecuación 4.1, el proceso se repite hasta que la contribución de  $R_{PCA}$  pueda ser descartada. En la práctica Fruit necesita realizar la estimación de  $R_{PCA}$  a partir de reducciones con diferentes valores en el umbral del método de PCA. Esto lo convierte en un método con un alto coste computacional tanto en tiempo de procesamiento como en espacio de almacenamiento. Otra desventaja es que se desconocen los posibles efectos sistemáticos que este método introduce en los mapas finales.

## 4.1. Metas a corto plazo



**Figura 4.1:** (a) Resultado de la reducción por PCA de un cúmulo ficticio extremadamente brillante cuya distribución de gas sigue un modelo  $\beta$  con un radio del núcleo  $\theta_c = 2'$ , parámetro  $\beta = 2/3$  generando un incremento en el centro del cúmulo  $\Delta I_0 = 1.3\text{Jy}$ . (b) reconstrucción de la emisión extendida mediante iteraciones sucesivas del método Fruit, nótese que se genera un perfil suave y se reduce los niveles de ruido en el mapa.

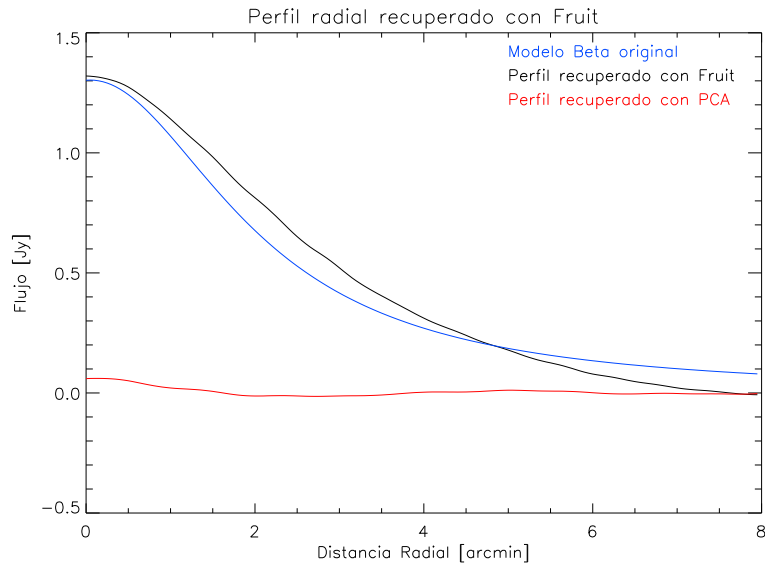
Este trabajo analizará los efectos sistemáticos del método Fruit y en su caso aplicará modificaciones a esta técnica con el objetivo de recuperar la emisión extendida en las observaciones e incrementar el nivel de confianza en las detecciones del SZE.

### 4.1.3. Restricciones computacionales

Cada observación de AzTEC@ASTE consiste en aproximadamente 20Gb de datos “en crudo” para aproximadamente 16 horas de observación empleando una técnica de barrido sinusoidal (*lissajous*). El proceso de limpieza utilizando PCA incrementa la ocupación en dispositivos de almacenamiento aproximadamente un factor  $\simeq 4$  para la reducción completa, lo cual para la muestra de 22 cúmulos implica disponer de un espacio de almacenamiento cercano a 2 Tb.

El método de Fruit demanda un volumen de almacenamiento similar ya que por cada observación es necesario tener tres versiones de la reducción preliminar utilizando PCA realizadas con diferentes valores de umbral en el grado de correlación de los eigenvectores, como resultado la recuperación de la emisión extendida emplea cerca de 120Gb por observación, por lo que se requiere aproximadamente de 2.5Tb.

El tiempo de cómputo requerido por este algoritmo es considerable mas no prohibitivo. En general, realizar esta reducción exige 6 veces el tiempo de una reducción empleando únicamente el método de PCA. El segundo propósito de mejorar el algoritmo de reducción orientado a la emisión extendida es reducir el coste en espacio y



**Figura 4.2:** Distribución radial del brillo superficial construida a partir de los mapas mostrados en la Figura 4.1, en color azul se muestra el perfil de brillo superficial del cúmulo ficticio convolucionado con un haz gaussiano de 30", en color rojo se muestra el efecto de la reducción PCA en la cual virtualmente desaparece por completo la emisión extendida, en color negro se muestra el resultado de aplicar el método Fruit para recuperar la emisión extendida.

tiempo de cómputo.

### Otros métodos de reducción

El mejorar el proceso de reducción no estará limitado a modificar los métodos empleados actualmente en el pipeline de AzTEC. Este trabajo explorará otras metodologías de reducción; un ejemplo a considerar es ampliar el algoritmo **CLEAN** [21], empleado en radioastronomía, a las observaciones de AzTEC (una aproximación de CLEAN a las observaciones milimétricas se describe en [38]).

El algoritmo CLEAN supone que una observación puede ser reproducida por la suma de fuentes puntuales en diferentes posiciones e intensidad creando un mapa sintético de la observación. Los pasos para crear el mapa sintético son:

1. Localizar en el mapa original el máximo absoluto en la intensidad.
2. Sustraer, del mapa original en la posición del máximo, un haz “sucio” multiplicado por una fracción fija de la intensidad del máximo. Añadir esta fracción de la intensidad a un mapa sintético como una fuente puntual (discreta).
3. Iterar sobre el mapa original hasta que no haya valores de intensidad mayores a un nivel de umbral fijo.

4. Crear el mapa limpio mediante convolucionar el mapa sintético con un haz “ideal” (generalmente un ajuste gaussiano al haz “sucio”).
5. Sumar los residuales del mapa original al mapa “limpio” para estimar las propiedades del ruido en la observación.

### 4.1.4. Reducción de datos multifrecuencia

Incluir datos con información de otras longitudes de onda facilita el análisis de las características de los cúmulos de galaxias, permite encontrar la contribución de las fuentes de contaminación a partir de su distribución espectral de energía (SED) y de modelos teóricos de la masa.

Los grandes almacenes de observaciones en varios telescopios y experimentos están disponibles en forma pública a través de internet. Algunas de las observaciones cuentan con calibración y reducciones nominales, sin embargo, para algunos campos es necesario realizar la reducción correspondiente. En particular, será necesaria la comprensión básica del proceso de reducción de los siguientes instrumentos:

- **Chandra y XMM-Newton** Las observaciones de alta resolución en rayos-X son necesarias para comprender el estado del medio intracúmulo. Los programas de reducciones de datos (CIAO y SAS respectivamente) proveen de herramientas útiles en el análisis de estas observaciones. Un ejemplo claro es la rutina de CIAO que provee de un método adaptivo apropiado para el cálculo de isocontornos en la emisión extendida.
- **Spitzer, Subaru y Gemini-S** Los datos en el espectro óptico e infrarrojo son fundamentales para identificar y reconstruir las SED fuentes puntuales que contribuyan a la emisión en las bandas milimétricas y por lo tanto contaminen las observaciones del SZE. Las galaxias miembro del cúmulo permitirán calcular el *redshift* del mismo mediante técnicas fotométricas.
- **VLA y ATCA** La presencia de emisión en radio puede indicar interacciones recientes entre cúmulos de galaxias por lo que algunas de las suposiciones del estado del ICM (como el equilibrio hidrostático) pueden llevar a estimar de forma incorrecta las propiedades del ICM. Las observaciones en radio de fuentes pertenecientes al cúmulo son una alternativa para estimar el *redshift* del cúmulo mediante técnicas fotométricas cuando se analizan en conjunto con las observaciones en el milimétrico.

### 4.1.5. Colaboración con BOLOCAM

Con el objetivo de aprovechar las características espectrales únicas del SZE, es de vital importancia incluir datos en otras frecuencias tanto en el incremento como en el

decremento del efecto Sunyaev-Zel'dovich . En nuestro caso buscar una colaboración con el equipo del instrumento BOLOCAM tiene las siguientes ventajas.

1. **Similitud entre instrumentos** AzTEC y BOLOCAM comparten grandes similitudes en su diseño, ambos instrumentos tienen el mismo número de bolómetros de la misma tecnología y la electrónica de lectura es virtualmente idéntica.
2. **Telescopio Anfitrión** Tanto ASTE como CSO son telescopios con un diámetro de 10 m, esto implica una ventaja en el análisis, ya que el factor entre la resolución de las observaciones depende, a primer orden, solo de la relación entre la longitud de onda de las mismas, esto es, AzTEC tiene la ventaja de un factor  $\simeq 2$  en resolución. Esta ventaja se ve compensada por la mayor sensibilidad de BOLOCAM en la detección de la emisión extendida también un factor  $\simeq 2$ .
3. **Dependencias en frecuencia** La relación en la magnitud del efecto Sunyaev-Zel'dovich entre observaciones a 2.1 y 1.1mm es  $\Delta I_{2.1mm} \simeq -\Delta I_{1.1mm}$  lo que permite realizar una estimación del valor esperado en flujo de BOLOCAM a partir de las observaciones de AzTEC y viceversa.

## 4.2. Metas a mediano plazo

### 4.2.1. Análisis de las observaciones

Con el objetivo de realizar en análisis de las observaciones se desarrollará un programa que permita la extracción de los parámetros del medio intracúmulo mediante los siguientes pasos:

1. **Identificación de fuentes de contaminación** El primer paso para eliminar las fuentes de contaminación, esto es, remover las fuentes puntuales identificadas por medio del algoritmo de detección incluido en el *pipeline* de AzTEC. Dentro de esta sección del análisis será necesario determinar si es más eficiente remover estas fuentes una vez que se ha creado el mapa de la observación o removerlas de la serie de tiempo de los bolómetros. El segundo paso es estimar la contribución de las fuentes no resueltas a la emisión detectada. Este proceso conocido como *deboosting* y consiste en realizar simulaciones para encontrar el flujo debido a las fuentes por debajo del límite de confusión de la observación.
2. **Ajuste de parámetros a la distribución del ICM** El proceso de ajuste toma como base un modelo para describir el ICM (modelo- $\beta$ , modelo- $\beta$  doble, etc) e intenta hallar los parámetros del modelo que maximicen una función de mérito (FOM). Existen varios métodos como el ajuste mediante  $\chi^2$ , cadenas de Markov, morfología matemática, etc. Un método alternativo consiste en deproyectar la distribución del ICM mediante la integral de Abel [38] bajo la suposición de simetría esférica en esta distribución.

3. **Estimación de errores y efectos sistemáticos** Debido a que los métodos de ajuste mencionados en el punto anterior, en general, son no lineales la estimación de los errores requiere de simulaciones empleando técnicas de remuestreo estadístico como “jack knife” o “bootstrap”, el mismo argumento puede emplearse en la estimación de los errores sistemáticos inducidos por las mejoras introducidas al proceso de reducción orientado a la emisión extendida.

### 4.2.2. Colaboración con ACT

El rol principal de las observaciones con AzTEC@ASTE con respecto a la colaboración con ACT consiste en aprovechar la resolución de estas observaciones para estimar la contribución de las fuentes puntuales. En la misma forma en la que se comparó los efectos de la resolución entre las observaciones realizadas con AzTEC en el JCMT con las realizadas en ASTE, las observaciones de ACT pueden estar contaminadas por la contribución de las fuentes puntuales submilimétricas.

La Figura 4.3 es una estimación de un mapa de MACSJ0454.1-0300 a una resolución de un minuto de arco utilizando como base el mapa de AzTEC@ASTE. Los contornos al centro de la imagen indican una distribución de brillo superficial bastante suave. Esto puede llevar a ignorar la presencia de las fuentes detectadas en los mapas JCMT y ASTE (A,B,C,D) con el riesgo de considerar que todo el flujo observado proviene de la emisión extendida del SZE.

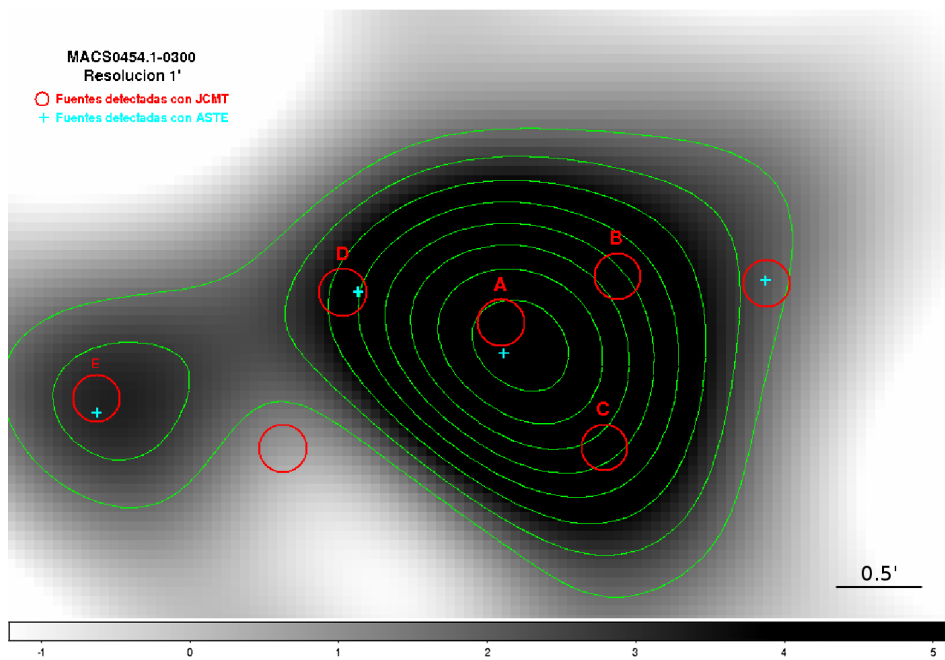
La colaboración con ACT puede separarse en dos segmentos:

1. Aplicar el análisis realizado a las observaciones de AzTEC@ASTE con el objetivo de estimar la contaminación de las fuentes puntuales, encontrar el efecto de realizar observaciones con una mayor resolución en la sensibilidad a la emisión extendida.
2. Realizar nuevas observaciones de cúmulos de galaxias detectados mediante las búsquedas realizadas por ACT con la instrumentación inicial del Gran Telescopio Milimétrico.

### 4.2.3. GTM primera luz

La velocidad de observación de AzTEC como instrumento de primera luz en el GTM  $\sim 0.3 \text{deg}^2 \text{hr}^{-1} \text{mJy}^{-2}$  en conjunto con la una mayor resolución  $\theta = 10''$  (GTM 30m) constituyen una herramienta eficaz para realizar mapas de campos selectos de telescopios realizando búsquedas a ciegas mediante el efecto Sunyaev-Zel'dovich como ACT y SPT.

AzTEC@GTM tiene la capacidad de realizar un mapa con un tamaño  $\simeq 12 \text{arcmin} \times 12 \text{arcmin}$  a una profundidad de  $\sigma \simeq 0.2 \text{mJy haz}^{-1}$  en aproximadamente 3.3hr, por comparación, la profundidad de los mapas de ACT está prevista en  $\sigma_T = 2 \mu\text{K}$  en



**Figura 4.3:** Estimación de un mapa de ACT en la banda de 1.1mm a partir de las observaciones de AzTEC@ASTE del cúmulo MACSJ0451.1-0300, este mapa fue creado mediante suavizar el mapa original de AzTEC con un haz gaussiano de 1'. Se muestra la posición de las fuentes resueltas en las observaciones de AzTEC@JCMT, al igual que en la Figura 3.3 las observaciones con esta resolución pueden mal interpretar una región extendida y suave como una detección del SZE.



### 4.3. Metas a largo plazo

---

un píxel de  $1.7\text{arcmin} \times 1.7\text{arcmin}$ . Esta profundidad se traduce a  $\sigma_F = 0.17\text{mJy}$  en observaciones realizadas a  $\lambda = 1.1\text{mm}$ , considerando que el ruido instrumental en este canal es  $700\mu\text{K s}^{-1/2}$ . El tiempo necesario para realizar esta observación es  $\simeq 34\text{hr}$ , significa que AzTEC@GTM puede generar mapas similares a los de ACT en tiempo  $\sim 10$  veces menor con una resolución mejor por un factor 6.

Los primeros mapas científicos del GTM realizados con AzTEC a principios de 2010 permitirán realizar un estudio detallado sobre una selección de cúmulos de galaxias detectados por ACT; con la capacidad de separar, gracias a la alta resolución, las fuentes puntuales de la emisión extendida generando estimados de masa menos sensibles a los errores sistemáticos e incrementando la precisión la masa estimada para los cúmulos de galaxias.

Dentro del repertorio de los instrumentos que estarán disponibles en las primeras observaciones del GTM encontramos a **SPEED**, una cámara constituida por cuatro bolómetros de frecuencia selectiva realizando observaciones simultáneas en cuatro bandas: dos en el incremento del SZE en 0.850, 1.1mm, el nulo 1.4mm y en el decremento 1.2mm diseñada para observaciones de este efecto y la reconstrucción de las SED de galaxias. El análisis en conjunto de cúmulos observados con AzTEC y con SPEED permitirá realizar estimaciones del efecto Sunyaev-Zel'dovich cinemático.

El siguiente instrumento de vital importancia en este estudio es el **Redshift Search Receiver**. Este instrumento permitirá obtener mediciones del *redshift* en las galaxias submilimétricas y establecer si estas galaxias son cercanas, miembro del cúmulo o son galaxias lejanas cuyo flujo puede estar afectado por el efecto de lente gravitacional.

## 4.3. Metas a largo plazo

### 4.3.1. Ciencia con los instrumentos de segunda generación en el GTM

La creación de instrumentos con un mayor desempeño y la capacidad de explotar el potencial del GTM es uno de los objetivos del grupo de cosmología milimétrica y la colaboración del GTM, para este proyecto se trabajará principalmente con dos instrumentos de segunda generación

1. **TolTEC** La cámara de continuo sucesora de AzTEC, consistirá en un arreglo de  $\simeq 5000$  píxeles empleando como detectores bolómetros TES, electrónica de lectura multiplexada mediante SQUIDS (tecnologías que están siendo utilizadas tanto en ACT como en SPT) observando en dos longitudes de onda  $\lambda_1 = 1.1\text{mm}$   $\lambda_2 = 2.1\text{mm}$  TolTEC ocupará por completo los 5' del plano focal del GTM. La velocidad de mapeo de  $10\text{deg}^2\text{mJy}^{-2}\text{hr}^{-1}$ .
2. **CIX** (Cluster Imaging eXperiment) La cámara sucesora de SPEED, con un tamaño en el campo de visión de  $\sim 2'$  generará rápidamente mapas hacia cúmulos

de galaxias en cuatro bandas simultáneas (0.85, 1.1, 1.4, 2.1mm) utilizando con 256 detectores en cada banda.

La segunda generación de instrumentos del GTM permitirá realizar observaciones en la totalidad de los cúmulos descubiertos u observados con experimentos como ACT, SPT, Planck y que puedan ser observados desde Sierra Negra.

### 4.3.2. Evolución de cúmulos de galaxias

Los escenarios de formación de la estructura a gran escala y las simulaciones numéricas de N-cuerpos establecen fuertes restricciones a la formación, evolución y dinámica de los halos de materia oscura en donde se alojan los cúmulos de galaxias masivos.

La distribución de los halos de materia oscura se obtiene a partir de suponer como ciertos un conjunto de parámetros cosmológicos, principalmente  $H_0$ ,  $\Omega_M$ ,  $\Omega_{DE}$ ,  $\sigma_8$ ,  $w$ , y generan un conjunto de predicciones para las cantidades observacionales como: la luminosidad observada en rayos-X, la temperatura electrónica, el flujo debido al Sunyaev-Zel'dovich, así como para las cantidades estadísticas como la densidad de cúmulos en función del *redshift*, la función de masa, las distribuciones de velocidad y el espectro de potencia.

El enfoque observacional actúa en sentido inverso, se presupone un modelo como válido y se ajustan los parámetros cosmológicos a partir de las observaciones; en el caso de la evolución de los cúmulos de galaxias realizaremos las siguientes preguntas:

**¿Cuál es el número de cúmulos de cierta masa en cada intervalo de *redshift*?** Esta pregunta equivale a encontrar como se construyeron los cúmulos de galaxias a partir de un proceso continuo de acumulación de materia. Responder esta pregunta requiere estimar la distribución de los cúmulos de galaxias en función de su masa y el *redshift*. Las estimaciones de masa se obtendrán mediante las observaciones del efecto Sunyaev-Zel'dovich realizadas con AzTEC y con la instrumentación de segunda generación del GTM. Se explotará la independencia en el *redshift* del efecto para construir una muestra completa de cúmulos con masas superiores a  $\sim 10^{14} M_\odot$ , más algunas observaciones de cúmulos con masas menores  $\gtrsim 8 \times 10^{13} M_\odot$ . La distribución en *redshift* se obtendrá con observaciones del Redshift Search Receiver y *redshift* fotométricos calculados a partir observaciones en el óptico, infrarrojo, (sub)milimétrico y radio.

**¿Qué valores esperamos de los parámetros cosmológicos?** De las observaciones del TSZE se realizarán comparaciones con los valores encontrados con los esperados por los modelos teóricos y del análisis de simulaciones numéricas como el Hubble Volume [28], en particular se pueden comparar las predicciones para cúmulos individuales. Un ejemplo sería la predicción de [29] para el flujo integrado del SZE considerando que la función de luminosidad de los cúmulos de galaxias

### 4.3. Metas a largo plazo

---

suponiendo un perfil Press-Schechter.

$$S_v [mJy] = 25.5h(1+z)g(x)\frac{1+X}{2}\frac{\Omega_B}{\Omega_T^{2/3}}\left[\frac{d_A(z)}{cH_0}\right]^{-2}\left(\frac{\Delta_{vir}}{18\pi^2}\right)\left(\frac{M}{10^{15}h^{-1}M_\odot}\right) \quad (4.3)$$

donde  $X$  es la fracción de hidrógeno en el ICM y  $h$  es la parametrización de la constante de Hubble en unidades de  $100\text{km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ .

**¿Cómo afecta la energía oscura a los cúmulos de galaxias?** Separar la señal del efecto Sunyaev-Zel'dovich cinemático de la señal del efecto térmico es un desafío para los experimentos actuales y futuros. Este trabajo analizará la posibilidad de encontrar mediciones confiables a partir de las observaciones mencionadas en secciones anteriores. En el caso de obtener resultados favorables, las observaciones realizadas con el GTM y la instrumentación de segunda generación permitirá construir la estadística del campo de velocidad en cúmulos de galaxias, con el potencial de establecer fuertes restricciones a la ecuación de estado de la energía oscura y su evolución con el tiempo cósmico.

## 4.4. Plan de trabajo

Actividad	2009																							
	julio			agosto			septiembre			octubre			noviembre			diciembre								
	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30
Reducción de las Observaciones																								
Catálogos de Fuentes																								
Creación de Mapas utilizando FL																								
Mejoras a la reducción de emisión extendida																								
Reducción de datos en otras longitudes de onda																								

Actividad	2010																							
	enero			febrero			marzo			abril			mayo			junio								
	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30
Fuentes de Contaminación																								
Algoritmo de Detección y Extracción SZE																								
Simulaciones																								
Colaboración con ACT																								

Actividad	2010																							
	julio			agosto			septiembre			octubre			noviembre			diciembre								
	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30
Algoritmo de Detección y Extracción SZE																								
Simulaciones																								
Observación con GTM (AzTEC, SPEED, RSR)																								
Datos de SPT																								

Actividad	2011																							
	enero			febrero			marzo			abril			mayo			junio								
	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30
Resultados Preliminares*																								
Observación con GTM (AzTEC, SPEED, RSR)																								
Reducción de las Observaciones de GTM																								
Datos de Planck																								

Actividad	2011																							
	julio			agosto			septiembre			octubre			noviembre			diciembre								
	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30
Reducción de las Observaciones de GTM																								
Análisis de observaciones del GTM																								
GTM (2ª generación de instrumentos)																								
Datos de Planck																								

Actividad	2012																							
	enero			febrero			marzo			abril			mayo			junio								
	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30
Análisis de observaciones del GTM (2ª generación)																								
Resultados Finales																								

\*AzTEC @ASTE+ACT+BOLOCAM

# Índice de Figuras

1.1. Estructura a Gran Escala . . . . .	2
1.2. Desplazamiento del espectro de emisión del polvo debido a la corrección-K negativa . . . . .	4
1.3. Límite de detección en observaciones del SZE . . . . .	5
1.4. Observaciones del efecto Sunyaev-Zel'dovich en el radio para cúmulos de galaxias cercanos . . . . .	8
1.5. Restricciones a los parámetros cosmológicos a partir de simulaciones de la densidad de cúmulos de galaxias en función del <i>redshift</i> . . . . .	9
2.1. Efecto Sunyaev-Zel'dovich térmico . . . . .	15
2.2. Efecto Sunyaev-Zel'dovich cinemático . . . . .	16
2.3. Perfiles radiales de densidad del medio intracúmulo . . . . .	20
2.4. Determinación de la constante de Hubble empleando observaciones de rayos-X y del efecto Sunyaev-Zel'dovich . . . . .	22
2.5. Efecto de los parámetros cosmológicos sobre el espectro de potencia del efecto Sunyaev-Zel'dovich . . . . .	24
2.6. Espectro de potencia del efecto Sunyaev-Zel'dovich y su relación con el parámetro $\sigma_8$ . . . . .	25
3.1. Mapa de la emisión galáctica de polvo a $100\mu\text{m}$ alrededor de la región de observación de ACT . . . . .	33
3.2. Densidad superficial de fuentes milimétricas a $\lambda = 1.1\text{mm}$ . . . . .	35
3.3. Mapas AzTEC de MACSJ045.1-0300 tomados en ASTE y JCMT . . . . .	40
3.4. Observaciones del efecto Sunyaev-Zel'dovich sobre el cúmulo 1E 0657-56 (Bullet Cluster) realizadas por ACBAR, APEX-SZ, SPT y AzTEC . . . . .	44
4.1. Simulación de la recuperación de emisión extendida por el método Fruit . . . . .	47
4.2. Distribución radial de brillo superficial recuperada con el método Fruit para un modelo $\beta$ . . . . .	48

- 4.3. Estimación de un mapa de ACT en la banda de 1.1mm a partir de las observaciones de AzTEC@ASTE para el cúmulo MACSJ0451.1-0300 . 52

# Índice de Tablas

3.1. Resumen de los instrumentos enfocados en la detección del efecto Sunyaev-Zel'dovich . . . . .	38
3.2. Muestra de cúmulos de galaxias del AzTEC Cluster Evolution Survey . . . . .	39
3.3. Estimación de masa para los cúmulos de ACES . . . . .	41





# Bibliografía

- [1] G. O. Abell. The Distribution of Rich Clusters of Galaxies. *ApJS*, 3:211–+, May 1958.
- [2] N. Aghanim, S. Majumdar, and J. Silk. Secondary anisotropies of the CMB. *Reports on Progress in Physics*, 71(6):066902–+, June 2008.
- [3] R. A. Alpher, H. Bethe, and G. Gamow. The origin of chemical elements. *Phys. Rev.*, 73(7):803–804, Apr 1948.
- [4] J. E. Austermann, J. S. Dunlop, T. A. Perera, K. S. Scott, G. W. Wilson, I. Aretxaga, D. H. Hughes, O. Almaini, E. L. Chapin, S. C. Chapman, M. Cirasuolo, D. L. Clements, K. E. K. Coppin, L. Dunne, S. Dye, S. A. Eales, E. Egami, D. Farrah, D. Ferrusca, S. Flynn, D. Haig, M. Halpern, E. Ibar, R. J. Ivison, E. van Kampen, Y. Kang, S. Kim, C. Lacey, J. D. Lowenthal, P. D. Mauskopf, R. J. McLure, A. M. J. Mortier, M. Negrello, S. Oliver, J. A. Peacock, A. Pope, S. Rawlings, G. Rieke, I. Roseboom, M. Rowan-Robinson, D. Scott, S. Serjeant, I. Smail, A. M. Swinbank, J. A. Stevens, M. Velazquez, J. Wagg, and M. S. Yun. AzTEC Half Square Degree Survey of the SHADES Fields – I. Maps, Catalogues, and Source Counts. *ArXiv e-prints*, July 2009.
- [5] B. A. Benson, S. E. Church, P. A. R. Ade, J. J. Bock, K. M. Ganga, J. R. Hinderks, P. D. Mauskopf, B. Philhour, M. C. Runyan, and K. L. Thompson. Peculiar Velocity Limits from Measurements of the Spectrum of the Sunyaev-Zeldovich Effect in Six Clusters of Galaxies. *ApJ*, 592:674–691, August 2003.
- [6] S. Bhattacharya and A. Kosowsky. Dark energy constraints from galaxy cluster peculiar velocities. *Physical Reviews D.*, 77(8):083004–+, April 2008.
- [7] S. Bhattacharya and A. Kosowsky. Systematic errors in Sunyaev Zeldovich surveys of galaxy cluster velocities. *Journal of Cosmology and Astro-Particle Physics*, 8:30–+, August 2008.
- [8] M. Birkinshaw, S. F. Gull, and K. J. E. Northover. Measurements of the gas contents of clusters of galaxies by observations of the background radiation at 10-6 GHz. *MNRAS*, 185:245–262, October 1978.

## Bibliografía

---

- [9] M. Birkinshaw and K. Lancaster. The Sunyaev-Zel'dovich Effect in Cosmology and Cluster Physics. In M. Plionis, O. López-Cruz, and D. Hughes, editors, *A Pan-Chromatic View of Clusters of Galaxies and the Large-Scale Structure*, volume 740 of *Lecture Notes in Physics*, Berlin Springer Verlag, pages 256–285, 2008.
- [10] H. Bohringer, P. Schuecker, L. Guzzo, C. A. Collins, W. Voges, R. G. Cruddace, A. Ortiz-Gil, G. Chincarini, S. De Grandi, A. C. Edge, H. T. MacGillivray, D. M. Neumann, S. Schindler, and P. Shaver. The ROSAT-ESO Flux Limited X-ray (REFLEX) Galaxy cluster survey. V. The cluster catalogue. *A&A*, 425:367–383, October 2004.
- [11] M. Bonamente, M. K. Joy, S. J. LaRoque, J. E. Carlstrom, E. D. Reese, and K. S. Dawson. Determination of the Cosmic Distance Scale from Sunyaev-Zel'dovich Effect and Chandra X-Ray Measurements of High-Redshift Galaxy Clusters. *ApJ*, 647:25–54, August 2006.
- [12] S. Borgani. Cosmology with Clusters of Galaxies. In M. Plionis, O. López-Cruz, and D. Hughes, editors, *A Pan-Chromatic View of Clusters of Galaxies and the Large-Scale Structure*, volume 740 of *Lecture Notes in Physics*, Berlin Springer Verlag, pages 287–+, 2008.
- [13] J. E. Carlstrom, G. P. Holder, and E. D. Reese. Cosmology with the Sunyaev-Zel'dovich Effect. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 40:643–680, 2002.
- [14] J. E. Carlstrom, M. K. Joy, L. Grego, G. P. Holder, W. L. Holzapfel, J. J. Mohr, S. Patel, and E. D. Reese. Imaging the Sunyaev-Zel'dovich Effect. *Physica Scripta Volume T*, 85:148–+, 2000.
- [15] H. Ezawa, R. Kawabe, K. Kohno, and S. Yamamoto. The Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE). In J. M. Oschmann, Jr., editor, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 5489 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 763–772, October 2004.
- [16] R. R. Gal. Optical Detection of Galaxy Clusters. *ArXiv Astrophysics e-prints*, January 2006.
- [17] S. R. Golwala, J. E. Aguirre, K. Basu, B. A. Benson, F. Bertoldi, J. O. Burns, S. E. Church, M. J. Devlin, M. Dobbs, J. W. Fowler, E. J. Hallman, W. L. Holzapfel, A. V. Kravtsov, A. T. Lee, D. P. Marrone, B. S. Mason, A. D. Miller, S. T. Myers, D. Nagai, M. Nord, L. Page, C. Pfrommer, E. Pierpaoli, J. E. Ruhl, and G. W. Wilson. Calibrating Galaxy Clusters as a Tool for Cosmology via Studies of the Intracluster Medium. *Astronomy*, 2010:96–+, 2009.

- [18] S. F. Gull and K. J. E. Northover. Detection of hot gas in clusters of galaxies by observation of the microwave background radiation. *Nature*, 263:572–+, October 1976.
- [19] N. W. Halverson, T. Lanting, P. A. R. Ade, K. Basu, A.Ñ. Bender, B. A. Benson, F. Bertoldi, H. . Cho, G. Chon, J. Clarke, M. Dobbs, D. Ferrusca, R. Guesten, W. L. Holzappel, A. Kovacs, J. Kennedy, Z. Kermish, R. Kneissl, A. T. Lee, M. Lueker, J. Mehl, K. M. Menten, D. Muders, M. Nord, F. Pacaud, T. Plagge, C. Reichardt, P. L. Richards, R. Schaaf, P. Schilke, F. Schuller, D. Schwan, H. Spieler, C. Tucker, A. Weiss, and O. Zahn. Sunyaev-Zel’dovich Effect Observations of the Bullet Cluster (1E 0657-56) with APEX-SZ. *ArXiv e-prints*, July 2008.
- [20] G. Helou, B. F. Madore, M. Schmitz, M. D. Bica, X. Wu, and J. Bennett. *The NASA/IPAC Extragalactic Database*, pages 89–+. May 1991.
- [21] J. A. Högbom. Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines. *A&AS*, 15:417–+, June 1974.
- [22] W. S. Holland, E. I. Robson, W. K. Gear, C. R. Cunningham, J. F. Lightfoot, T. Jenness, R. J. Ivison, J. A. Stevens, P. A. R. Ade, M. J. Griffin, W. D. Duncan, J. A. Murphy, and D. A. Naylor. SCUBA: a common-user submillimetre camera operating on the James Clerk Maxwell Telescope. *MNRAS*, 303:659–672, March 1999.
- [23] W. L. Holzappel, T. M. Wilbanks, P. A. R. Ade, S. E. Church, M. L. Fischer, P. D. Maukopf, D. E. Osgood, and A. E. Lange. The Sunyaev-Zeldovich Infrared Experiment: A Millimeter-Wave Receiver for Cluster Cosmology. *ApJ*, 479:17–+, April 1997.
- [24] K. M. Huffenberger and U. Seljak. Prospects for ACT: Simulations, power spectrum, and non-Gaussian analysis. *New Astronomy*, 10:491–515, June 2005.
- [25] D. Hughes. Cosmological Surveys at Submillimetre Wavelengths. In A. Mazure, O. Le Fèvre, and V. Le Brun, editors, *Clustering at High Redshift*, volume 200 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pages 81–+, 2000.
- [26] N. Itoh, Y. Kohyama, and S. Nozawa. Relativistic Corrections to the Sunyaev-Zeldovich Effect for Clusters of Galaxies. *ApJ*, 502:7–+, July 1998.
- [27] M. Jones, R. Saunders, P. Alexander, M. Birkinshaw, N. Dilon, K. Grainge, S. Hancock, A. Lasenby, D. Lefebvre, and G. Pooley. An image of the Sunyaev-Zel’dovich effect. *Nature*, 365:320–323, September 1993.
- [28] S. T. Kay, A. R. Liddle, and P. A. Thomas. Sunyaev-Zel’dovich predictions for the Planck Surveyor satellite using the Hubble Volume simulations. *MNRAS*, 325:835–844, August 2001.

## Bibliografía

---

- [29] T. Kitayama, S. Sasaki, and Y. Suto. Cosmological Implications of Number Counts of Clusters of Galaxies:  $\log N$ – $\log S$  in X-Ray and Submm Bands. 50:1–11, February 1998.
- [30] E. Komatsu and U. Seljak. The Sunyaev-Zel’dovich angular power spectrum as a probe of cosmological parameters. *MNRAS*, 336:1256–1270, November 2002.
- [31] A. Kosowsky. The Atacama Cosmology Telescope. *New Astronomy Review*, 47:939–943, December 2003.
- [32] M. Kowalski, D. Rubin, G. Aldering, R. J. Agostinho, A. Amadon, R. Amanullah, C. Balland, K. Barbary, G. Blanc, P. J. Challis, A. Conley, N. V. Connolly, R. Covarrubias, K. S. Dawson, S. E. Deustua, R. Ellis, S. Fabbro, V. Fadeyev, X. Fan, B. Farris, G. Folatelli, B. L. Frye, G. Garavini, E. L. Gates, L. Germany, G. Goldhaber, B. Goldman, A. Goobar, D. E. Groom, J. Haissinski, D. Hardin, I. Hook, S. Kent, A. G. Kim, R. A. Knop, C. Lidman, E. V. Linder, J. Mendez, J. Meyers, G. J. Miller, M. Moniez, A. M. Mourão, H. Newberg, S. Nobili, P. E. Nugent, R. Pain, O. Perdureau, S. Perlmutter, M. M. Phillips, V. Prasad, R. Quimby, N. Regnault, J. Rich, E. P. Rubenstein, P. Ruiz-Lapuente, F. D. Santos, B. E. Schaefer, R. A. Schommer, R. C. Smith, A. M. Soderberg, A. L. Spadafora, L.-G. Strolger, M. Strovink, N. B. Suntzeff, N. Suzuki, R. C. Thomas, N. A. Walton, L. Wang, W. M. Wood-Vasey, and J. L. Yun. Improved Cosmological Constraints from New, Old, and Combined Supernova Data Sets. *ApJ*, 686:749–778, October 2008.
- [33] S. J. LaRoque, M. Bonamente, J. E. Carlstrom, M. K. Joy, D. Nagai, E. D. Reese, and K. S. Dawson. X-Ray and Sunyaev-Zel’dovich Effect Measurements of the Gas Mass Fraction in Galaxy Clusters. *ApJ*, 652:917–936, December 2006.
- [34] F. Menanteau, J. P. Hughes, R. Jimenez, C. Hernandez-Monteagudo, L. Verde, A. Kosowsky, K. Moodley, L. Infante, and N. Roche. Southern Cosmology Survey. I. Optical Cluster Detections and Predictions for the Southern Common-Area Millimeter-Wave Experiments. *ApJ*, 698:1221–1231, June 2009.
- [35] S. T. Myers, J. E. Baker, A. C. S. Readhead, E. M. Leitch, and T. Herbig. Measurements of the Sunyaev-Zeldovich Effect in the Nearby Clusters A478, A2142, and A2256. *ApJ*, 485:1–+, August 1997.
- [36] D. Nagai, A. V. Kravtsov, and A. Vikhlinin. Effects of Galaxy Formation on Thermodynamics of the Intracluster Medium. *ApJ*, 668:1–14, October 2007.
- [37] M. D. Niemack. *Towards dark energy: Design, development, and preliminary data from ACT*. PhD thesis, Princeton University, 2008.
- [38] M. Nord, K. Basu, F. Pacaud, P. A. R. Ade, A.Ñ. Bender, B. A. Benson, F. Bertoldi, H. . Cho, G. Chon, J. Clarke, M. Dobbs, D. Ferrusca, N. W. Halverson, W. L.

- Holzzapfel, C. Horellou, D. Johansson, J. Kennedy, Z. Kermish, R. Kneissl, T. Lan-ting, A. T. Lee, M. Lueker, J. Mehl, K. M. Menten, T. Plagge, C. L. Reichardt, P. L. Richards, R. Schaaf, D. Schwan, H. Spieler, C. Tucker, A. Weiss, and O. Zahn. Multi-frequency imaging of the galaxy cluster Abell 2163 using the Sunyaev-Zel'dovich Effect. *ArXiv e-prints*, February 2009.
- [39] S. Nozawa, N. Itoh, Y. Kawana, and Y. Kohyama. Relativistic Corrections to the Sunyaev-Zeldovich Effect for Clusters of Galaxies. IV. Analytic Fitting Formula for the Numerical Results. *ApJ*, 536:31–35, June 2000.
- [40] J. P. Ostriker and P. J. Steinhardt. Cosmic Concordance. *ArXiv Astrophysics e-prints*, May 1995.
- [41] F. Pacaud, M. Pierre, C. Adami, B. Altieri, S. Andreon, L. Chiappetti, A. Detal, P.-A. Duc, G. Galaz, A. Gueguen, J.-P. Le Fèvre, G. Hertling, C. Libbrecht, J.-B. Melin, T.-J. Ponman, H. Quintana, A. Refregier, P.-G. Sprimont, J. Surdej, I. Valtchanov, J.-P. Willis, D. Alloin, M. Birkinshaw, M.N. Bremer, O. Garcet, C. Jean, L.-R. Jones, O. Le Fevre, D. Maccagni, A. Mazure, D. Proust, H.-J.-A. Röttgering, and G. Trinchieri. The XMM-LSS survey: the Class 1 cluster sample over the initial 5 deg<sup>2</sup> and its cosmological modelling. *MNRAS*, 382:1289–1308, December 2007.
- [42] P. Palunas, H. I. Teplitz, P. J. Francis, G. M. Williger, and B. E. Woodgate. The Distribution of Ly $\alpha$ -Emitting Galaxies at z=2.38. *ApJ*, 602:545–554, February 2004.
- [43] J. A. Peacock, The 2DF Galaxy Redshift Survey Team, M. Colless, J. Peacock, C. M. Baugh, J. Bland-Hawthorn, T. Bridges, R. Cannon, S. Cole, C. Collins, W. Couch, N. Cross, G. Dalton, K. Deeley, R. de Propris, S. Driver, G. Efstathiou, R. S. Ellis, C. S. Frenk, K. Glazebrook, C. Jackson, O. Lahav, I. Lewis, S. Lumsden, S. Maddox, D. Madgwick, P. Norberg, W. Percival, B. Peterson, W. Sutherland, and K. Taylor. Measuring Large-Scale Structure with the 2dF Galaxy Redshift Survey. In S. Cristiani, A. Renzini, and R. E. Williams, editors, *Deep Fields*, pages 221–+, 2001.
- [44] Gott J. R., M. Juri'c, D. Schlegel, F. Hoyle, M. Vogeley, M. Tegmark, N. Bahcall, and J. Brinkmann. A Map of the Universe. *ApJ*, 624:463–484, May 2005.
- [45] J. Raddick. The Sloan Digital Sky Survey. *Journal of the American Association of Variable Star Observers (JAAVSO)*, 31:177–+, December 2003.
- [46] E. D. Reese. Measuring the Hubble Constant with the Sunyaev-Zel'dovich Effect. In W. L. Freedman, editor, *Measuring and Modeling the Universe*, pages 138–+, 2004.

- [47] A. K. Romer, P. T. P. Viana, A. R. Liddle, and R. G. Mann. A Serendipitous Galaxy Cluster Survey with XMM: Expected Catalogue Properties and Scientific Applications. *ArXiv Astrophysics e-prints*, November 1999.
- [48] D. Rubin, E. V. Linder, M. Kowalski, G. Aldering, R. Amanullah, K. Barbary, N. V. Connolly, K. S. Dawson, L. Faccioli, V. Fadeyev, G. Goldhaber, A. Goobar, I. Hook, C. Lidman, J. Meyers, S. Nobili, P. E. Nugent, R. Pain, S. Perlmutter, P. Ruiz-Lapuente, A. L. Spadafora, M. Strovink, N. Suzuki, and H. Swift. Looking Beyond Lambda with the Union Supernova Compilation. *ApJ*, 695:391–403, April 2009.
- [49] J. Ruhl, P. A. R. Ade, J. E. Carlstrom, H.-M. Cho, T. Crawford, M. Dobbs, C. H. Greer, N. w. Halverson, W. L. Holzapfel, T. M. Lanting, A. T. Lee, E. M. Leitch, J. Leong, W. Lu, M. Lueker, J. Mehl, S. S. Meyer, J. J. Mohr, S. Padin, T. Plagge, C. Pryke, M. C. Runyan, D. Schwan, M. K. Sharp, H. Spieler, Z. Staniszewski, and A. A. Stark. The South Pole Telescope. In C. M. Bradford, P. A. R. Ade, J. E. Aguirre, J. J. Bock, M. Dragovan, L. Duband, L. Earle, J. Glenn, H. Matsu-hara, B. J. Naylor, H. T. Nguyen, M. Yun, and J. Zmuidzinas, editors, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 5498 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 11–29, October 2004.
- [50] M. C. Runyan, P. A. R. Ade, R. S. Bhatia, J. J. Bock, M. D. Daub, J. H. Goldstein, C. V. Haynes, W. L. Holzapfel, C. L. Kuo, A. E. Lange, J. Leong, M. Lueker, M. Newcomb, J. B. Peterson, C. Reichardt, J. Ruhl, G. Sirbi, E. Torbet, C. Tucker, A. D. Turner, and D. Woolsey. ACBAR: The Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver. *ApJS*, 149:265–287, December 2003.
- [51] C. L. Sarazin. Gas Dynamics in Clusters of Galaxies. In M. Plionis, O. López-Cruz, and D. Hughes, editors, *A Pan-Chromatic View of Clusters of Galaxies and the Large-Scale Structure*, volume 740 of *Lecture Notes in Physics*, Berlin Springer Verlag, pages 1–4020, 2008.
- [52] D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Davis. Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds. *ApJ*, 500:525–+, June 1998.
- [53] F. P. Schloerb, L. Carrasco, and G. W. Wilson. Large Millimeter Telescope (LMT) status. In J. M. Oschmann and L. M. Stepp, editors, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 4837 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 129–139, February 2003.
- [54] D. Schwan, F. Bertoldi, S. Cho, M. Dobbs, R. Guesten, N. W. Halverson, W. L. Holzapfel, E. Kreysa, T. M. Lanting, A. T. Lee, M. Lueker, J. Mehl, K. Menten, D. Muders, M. Myers, T. Plagge, A. Raccanelli, P. Schilke, P. L. Richards,



- H. Spieler, and M. White. APEX-SZ a Sunyaev-Zel'dovich galaxy cluster survey. *New Astronomy Review*, 47:933–937, December 2003.
- [55] K. S. Scott, J. E. Austermann, T. A. Perera, G. W. Wilson, I. Aretxaga, J. J. Bock, D. H. Hughes, Y. Kang, S. Kim, P. D. Mauskopf, D. B. Sanders, N. Scoville, and M. S. Yun. Aztec millimetre survey of the cosmos field: I. data reduction and source catalogue. *MNRAS*, 385:2225, 2008.
- [56] G. Siringo, E. Kreysa, A. Kovacs, F. Schuller, A. Weiss, W. Esch, H.-P. Gemund, N. Jethava, G. Lundershausen, A. Colin, R. Gusten, K. M. Menten, A. Beelen, F. Bertoldi, J. W. Beeman, and E. E. Haller. The Large APEX BOlometer CAmera LABOCA. *A&A*, 497:945–962, April 2009.
- [57] Z. Staniszewski, P. A. R. Ade, K. A. Aird, B. A. Benson, L. E. Bleem, J. E. Carlstrom, C. L. Chang, H. . Cho, T. M. Crawford, A. T. Crites, T. de Haan, M. A. Dobbs, N. W. Halverson, G. P. Holder, W. L. Holzapfel, J. D. Hrubes, M. Joy, R. Keisler, T. M. Lanting, A. T. Lee, E. M. Leitch, A. Loehr, M. Lueker, J. J. McMahan, J. Mehl, S. S. Meyer, J. J. Mohr, T. E. Montroy, C. . Ngeow, S. Padin, T. Plagge, C. Pryke, C. L. Reichardt, J. E. Ruhl, K. K. Schaffer, L. Shaw, E. Shirokoff, H. G. Spieler, B. Stalder, A. A. Stark, K. Vanderlinde, J. D. Vieira, O. Zahn, and A. Zenteno. Galaxy clusters discovered with a Sunyaev-Zel'dovich effect survey. *ArXiv e-prints*, October 2008.
- [58] M. E. Sulkanen. Galaxy Cluster Shapes and Systematic Errors in H<sub>0</sub> Measured by the Sunyaev-Zeldovich Effect. *ApJ*, 522:59–65, September 1999.
- [59] R. A. Sunyaev and Y. B. Zeldovich. Small-Scale Fluctuations of Relic Radiation. *Ap&SS*, 7:3–19, April 1970.
- [60] P. S. Udomprasert, B. S. Mason, and A. C. S. Readhead. The Sunyaev-Zel'dovich Effect with the Cosmic Background Imager. In *Constructing the Universe with Clusters of Galaxies*, 2000.
- [61] R. van de Weygaert and J.R. Bond. Observations and Morphology of the Cosmic Web. In M. Plionis, O. López-Cruz, and D. Hughes, editors, *A Pan-Chromatic View of Clusters of Galaxies and the Large-Scale Structure*, volume 740 of *Lecture Notes in Physics*, Berlin Springer Verlag, pages 409–+, 2008.
- [62] W. Vanderveen. The James Clerk Maxwell telescope. In B. H. Kaldeich, editor, *Infrared Spectroscopy in Astronomy*, volume 290 of *ESA Special Publication*, pages 567–569, September 1989.
- [63] S. Weinberg. The cosmological constant problem. *Reviews of Modern Physics*, 61:1–23, January 1989.

- [64] M. Wenger, F. Ochsenbein, D. Egret, P. Dubois, F. Bonnarel, S. Borde, F. Genova, G. Jasniewicz, S. Laloë, S. Lesteven, and R. Monier. The SIMBAD astronomical database. The CDS reference database for astronomical objects. *A&AS*, 143:9–22, April 2000.
- [65] G. W. Wilson, P. A. Ade, I. Aretxaga, J. Austermann, C. Battersby, J. J. Bock, J. Glenn, S. R. Golwala, D. Haig, D. H. Hughes, Y. Kang, S. Kim, J. Lowenthal, P. D. Mauskopf, T. Perera, K. Scott, C. Roberts, I. Yoon, and M. S. Yun. Submillimeter Galaxy Surveys with AzTEC. In *Bulletin of the American Astronomical Society*, volume 38 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, pages 146–+, June 2006.
- [66] G. W. Wilson, J. E. Austermann, T. A. Perera, K. S. Scott, P. A. R. Ade, J. J. Bock, J. Glenn, S. R. Golwala, S. Kim, Y. Kang, D. Lydon, P. D. Mauskopf, C. R. Predmore, C. M. Roberts, K. Souccar, and M. S. Yun. The AzTEC mm-wavelength camera. *MNRAS*, 386:807–818, May 2008.
- [67] G. W. Wilson, D. H. Hughes, I. Aretxaga, H. Ezawa, J. E. Austermann, S. Doyle, D. Ferrusca, I. Hernandez-Curiel, R. Kawabe, T. Kitayama, K. Kohno, A. Kuboi, H. Matsuo, P. D. Mauskopf, Y. Murakoshi, A. Montana, P. Natarajan, T. Oshima, N. Ota, T. A. Perera, J. Rand, K. S. Scott, K. Tanaka, M. Tsuboi, C. C. Williams, N. Yamaguchi, and M. S. Yun. A bright, dust-obscured, millimetre-selected galaxy beyond the Bullet Cluster (1E0657-56). *MNRAS*, 390:1061–1070, November 2008.
- [68] A. Wootten. Atacama Large Millimeter Array (ALMA). In J. M. Oschmann and L. M. Stepp, editors, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 4837 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 110–118, February 2003.
- [69] Y.-J. Xue and X.-P. Wu. Properties of the double  $\beta$  model for intracluster gas. *MNRAS*, 318:715–723, November 2000.
- [70] M. Zemcov, C. Borys, M. Halpern, P. Mauskopf, and D. Scott. A study of the Sunyaev-Zel’dovich increment using archival SCUBA data. *MNRAS*, 376:1073–1098, April 2007.