

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

Evolución de la población de galaxias fuertemente oscurecidas con altos corrimientos al rojo en campos sin sesgo con BLAST y AzTEC

por Emmaly Aguilar Pérez

Tesis 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

> Supervisada por: Dr. David H. Hughes, INAOE Dra. Itziar Aretxaga, INAOE

> > Tonantzintla, Puebla 25 de Agosto de 2009

© INADE 2009

Derechos Reservados

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

Resumen

La astronomía milimétrica nos permite investigar las primeras etapas evolutivas de las grandes estructuras que hoy existen. Para aprovechar esto, el presente trabajo muestra cómo se puede estimar la historia de formación estelar, por medio de la observación en bandas milimétricas, de la población de galaxias fuertemente oscurecida que se encuentra a altos corrimientos al rojo.

Abstract

Millimeter astronomy allows us to investigate the early stages of the massive structures in the nearby universe. In order to exploit this, the present work shows how we can estimate the star formation history of a heavily obscured galaxy population at high redshift by means of millimeter wavelenght observations.

Agradecimientos

El trabajo presentado en esta tesis ha sido logrado gracias al apoyo económico brindado por CONACYT a través de la beca que me fue otorgada al ingresar la maestría. También quiero agradecerle al personal del INAOE por el apoyo académico, económico, administrativo y por mantener un entorno favorable para la superación profesional.

Particularmente quiero agradecerle a mis asesores David H. Hughes e Itziar Aretxaga por darme la oportunidad de trabajar con ellos, pero sobretodo por tener la paciencia y el conocimiento suficiente para introducirme en el área de investigación.

Por otro lado, quisiera agradecer a los grupos de investigación de AzTEC (Grant Wilson) en la Universidad de Massachusetts y BLAST (Mark Devlin) en la Universidad de Pennsylvania porque gracias a ellos tuve acceso al material para desarrollar el contenido de mi tesis.

El apoyo académico y emocional de mis compañeros de trabajo, mis amigos: Milagros Zeballos, David Sanchez, Alfredo Montaña, Idalia Hernández y Daniel Ferrusca, fue fundamental para mi superación profesional y personal.

Finalmente quiero agradecerle a mi novio Salvador Ventura por todo, sin su apoyo incondicional no lo hubiera logrado. Asimismo el apoyo general de mi familia Martha Pérez, Elias Aguilar y Sergio E. Aguilar ha sido clave para el desarrollo en todos los aspectos de mi vida.

Prefacio

El tema que se presenta en este trabajo está relacionado con el estudio de galaxias oscurecidas por polvo y detectadas en bandas (sub-)milimétricas a través de censos en campos sin sesgo. Se ha encontrado que este tipo de galaxias tienen altos corrimientos al rojo por lo que pueden representar las primeras etapas evolutivas de las galaxias masivas que hoy existen.

En el primer capítulo se presenta una compilación de la literatura referente a la Astrofísica Milimétrica en la que se plantea la importancia de la observación en bandas (sub-)milimétricas y cómo estos estudios han revolucionado la manera de entender las primeras etapas evolutivas de las galaxias, las cuales son difíciles de detectar en otras bandas.

Así, y con la ayuda de instrumentos de última generación se busca obtener censos amplios y profundos los cuales delimiten las propiedades de las fuentes (sub-)milimétricas. Particularmente, el análisis propuesto en esta tesis se basa en los datos obtenidos de los censos realizados en dos importantes campos sin sesgo: GOODS-South (Great Observatories Origins Deep Survey-South) y SEP (South Ecliptic Pole). El segundo capítulo describe estos dos campos resaltando sus ventajas y los telescopios que los observaron en el régimen (sub-)milimétrico y cuyos datos son utilizados en este trabajo: BLAST y AzTEC/ASTE. Además, se espera explotar la colaboración con los grupos de investigación de Herschel y GTM (Gran Telescopio Milimétrico) para complementar el análisis.

Establecida la procedencia de los datos, se necesita plantear la metodología para caracterizar la población (sub-)milimétrica en cuestión y así entender mejor las diferentes etapas evolutivas que representan, para lo cual, el tercer capítulo introduce las técnicas estadísticas para analizar los datos.

Debido a que el objetivo general de este trabajo es plantear la línea de investigación que se seguirá en el doctorado, el último capítulo retoma lo mencionado anteriormente para desarrollar el plan de trabajo que se espera realizar durante el doctorado.

Índice general

Ín	dice	general	1			
1.	Evo	lución de galaxias submilimétricas en el Universo lejano	3			
	1.1.		3			
	1.2.	Radiación Submm	6			
	1.3.	Galaxias Submm y su relación con otras poblaciones	14			
	1.4.	Preguntas clave	16			
2.	Importancia de la combinación de datos submm-mm con					
	otra	s bandas	19			
	2.1.	The Great Observatories Origins Deep Survey: GOODS	21			
	2.2.	South Ecliptic Pole: SEP	23			
	2.3.	The Balloon-borne Large Aperture Submillimeter Telescope:				
		BLAST	26			
	2.4.	Astronomical Thermal Emission Camera: AzTEC	28			
	2.5.	Gran Telescopio Milimétrico/AzTEC	31			
	2.6.	Herschel/SPIRE	34			
3.	Téc	nicas estadísticas para el análisis de datos	37			
	3.1.	Análisis de contrapartes	37			
	3.2.	Apilación de datos o stacking	38			
	3.3.	Estimación de corrimientos al rojo	42			
	3.4.	Estimación de flujos y completez	47			
	3.5.	Función de luminosidad	48			
	3.6.	Estimación de la historia de formación estelar	50			
4.	Trabajo a futuro					
	4.1.	Explotación simultánea de datos BLAST y AzTEC/ASTE	55			
	4.2.	Seguimiento de los datos de AzTEC/BLAST	57			

Evolución de galaxias submilimétricas en el Universo lejano

1.1. Introducción

Un individuo no puede decirse ser humano si, contemplando un cielo nocturno y estrellado, nunca se ha hecho preguntas fundamentales acerca del origen de todo cuanto le rodea, cuestionamientos que la investigación científica ha tratado de resolver a lo largo de su historia. En astrofísica y, aún lejos de la completa certeza, el trabajo teórico, de la mano con las observaciones, permiten atisbar al pasado para conocer la manera en que se formaron las grandes estructuras que ahora podemos observar, investigando así, la historia del Universo.

A través de la detección de galaxias en diferentes longitudes de onda, por ejemplo, se han podido conocer algunas propiedades de estos objetos a diferentes corrimientos al rojo, lo que implica la posibilidad de establecer o rechazar un vínculo evolutivo entre las diferentes morfologías de las galaxias. Simultáneamente se busca que los modelos de formación de galaxias expliquen las observaciones tanto del Universo cercano como lejano, por lo tanto la detección de galaxias a altos corrimientos al rojo nos permite restringir los modelos para mejorar las predicciones. Todo este desarrollo ha dado pie al nacimiento de nuevas ramas dentro de la astronomía observacional, entre las que se encuentran la astronomía submilimétrica (en adelante, submm) y milimétrica (mm), con las que se espera hallar información acerca de las

4 1.1. Introducción

propiedades de las galaxias lejanas con regiones de formación estelar.

El escenario de FE observado en la Vía Láctea establece una relación entre la presencia del polvo y dicha actividad, por lo tanto es posible estimar la tasa de FE a partir de la emisión IR que emite el polvo después de ser calentado por alguna fuente cercana de radiación óptica o ultravioleta. Debido a la expansión del Universo (z>1), el espectro IR se recorre a la banda submm, y ya que el Universo es transparente a estas longitudes de onda, se hace posible la observación de regiones de formación estelar en galaxias lejanas [95, 7, 55].

La única manera de explicar el fondo de radiación extragaláctico en el IR-lejano es a través de las galaxias submm, ya que sólo una pequeña fracción de la luminosidad total de galaxias con corrimientos al rojo bajos (figura 1.1) viene de galaxias con luminosidades mayores a $10^{12}L_{\odot}$, entonces el resto de la radiación tiene que originarse en el universo lejano por galaxias masivas que exceden en un factor de más de 100 a la cantidad de galaxias locales (figura 1.4).

Gracias a los primeros censos submm extragalácticos hechos por SCUBA (acrónimo en inglés de Submillimetre Common-User Bolometer Array, [51]) en la segunda mitad de la década de los 90 se ha descubierto una población de galaxias altamente oscurecidas por polvo con altas tasas de formación estelar (en adelante SFR, Star Formation Rate) de $\sim 1000 M_{\odot} yr^{-1}$. Además de explicar el fondo de radiación extragaláctico IR, las galaxias submm ofrecen importantes claves acerca de la historia de formación estelar cósmica y evolución de galaxias masivas ([95], [55], [7], [42], entre otros).

Utilizando la teoría de la relatividad general, transferencia radiativa y dinámica de gases, entre otros, se han construido modelos analíticos y simulaciones numéricas de formación de galaxias y poblaciones estelares que tratan de ser congruentes con las observaciones. El modelo más favorecido por la literatura es el de la materia oscura fría (cold dark matter, [76, 15]). Simulaciones numéricas basadas en este modelo han intentado explicar el crecimiento jerárquico de estructuras en el Universo [32], el cual implica la fusión de pequeñas estructuras para formar eventualmente los objetos masivos que hoy existen como las galaxias elípticas. No obstante, la búsqueda de una explicación a ciertos fenómenos observados tales como el decremento de la masa para formar estrellas en galaxias con la disminución del corrimiento al rojo, ha llevado a los investigadores a proponer modelos como el de reduc-

Capítulo 1 5

ción de estructuras o downsizing [31, 49] el cual plantea que el ensamble o la formación de galaxias masivas fue más rápido y anterior al de las galaxias menos masivas. Estimaciones de la función de masa estelar parecen mostrar un gran número de galaxias masivas a z>1 (por ejemplo, [36]) lo que se ha tomado como evidencia para contradecir el modelo jerárquico y a favor del escenario de colapso monolítico [66] el cual propone que las galaxias masivas se formaron como resultado de un solo brote estelar violento a grandes corrimientos al rojo y se han mantenido inactivas, o bien con pocos episodios de FE, desde entonces.

A pesar de las investigaciones escrupulosas hechas hasta el momento, los modelos, como una aproximación a la realidad, todavía presentan discrepancias con las observaciones, poniendo en evidencia que existen factores desconocidos sin considerar en el trabajo teórico.

Los diferentes grupos de investigación ([12], [95], [55], [42], [73], entre otros) se han encargado de perfeccionar las estrategias observacionales para realizar censos extragalácticos más profundos, o bien, más extensos con el fin de caracterizar de mejor manera la población submm. Hasta el día de hoy, los censos más profundos han sido logrados utilizando lentes gravitacionales generadas por cúmulos de galaxias, los cuales amplifican las galaxias submm débiles que se encuentran en el universo lejano [95]. Para realizar censos más extensos [37, 28, 74, 5] se requiere de telescopios más grandes como el Gran Telescopio Milimétrico (GTM, [87]) o instrumentos de nueva generación como SCUBA 2 (sucesor de SCUBA, [50]).

Importantes censos se han hecho con el fin de entender mejor las distribuciones de corrimientos al rojo, historia de formación estelar y la medida de agrupamiento de la poblaciones submm, entre otros. Estos censos se han logrado gracias a los detectores SCUBA, MAMBO (por sus siglas en inglés, Max-Planck Millimeter Bolometer, [63]) colocado en el telescopio de 30-m del Institut de Radio Astronomie Millimétrique (IRAM, [6]); BOLOCAM (BOLometric CAMera, [44]) instalada en el observatorio submm Caltech y más recientemente AzTEC (Astronomical Thermal Emission Camera, [104]) montada en JCMT (James Clerk Maxwell Telescope, [101]) y después en el telescopio japonés ASTE (Atacama Submillimiter Telescope Experiment, [43]) entre otros telescopios construidos sobre la superficie terrestre. Otros instrumentos como BLAST (Balloon-borne Large Aperture Submillimiter Telescope, [74]), motivados por la necesidad de tener más sensibilidad a longitudes de onda más cortas, retan a la tecnología llevando el telescopio

al cielo (literalmente). Próximamente, arreglos como SPIRE (Spectral and Photometric Imaging Receiver, [48]) en el Observatorio Espacial Hershel, AzTEC en el GTM o el interferómetro ALMA (Atacama Large Millimetre Array, [65]) nos brindarán mapas con mayor profundidad o bien mejor resolución que los instrumentos actuales.

En general, los datos en los que se centra este trabajo son los obtenidos de BLAST y AzTEC. El acceso a estos datos está garantizado y provienen de mi colaboración con ambos grupos de investigación. BLAST es un experimento submilimétrico internacional que tomó datos en los campos sin sesgo (Blank field) GOODS-S (Great Observatories Origins Deep Survey-South, [34]) y SEP (South Ecliptic Pole) a 250, 350 y 500 μ m en diciembre de 2006 [33]. Por su parte, AzTEC es una cámara bolométrica creada para el GTM que, montada en el telescopio japonés de 10-m ASTE en Chile, observó a 1.1 mm los mismos campos que BLAST en el periodo junio-octubre del 2007 (Scott et al. en preparación). La observación en estas bandas favorece la detección de poblaciones oscurecidas con altos corrimientos al rojo ($z \ge 1$) por lo que al combinar estos datos podemos obtener más información acerca de la naturaleza de las galaxias submm y tratar de complementar el escenario de formación y evolución de galaxias.

1.2. Radiación Submm

La observación directa de procesos como la formación de galaxias oscurecidas por polvo es posible gracias a la nueva generación de detectores que son sensibles a las bandas submm-mm, cuyo rango va desde unas 200 μ m a 1 mm, y de 1 a 10 mm, respectivamente. A excepción de la radiación del fondo cósmico de microondas, la mitad de toda la radiación del fondo extragaláctico observada es emitida en el IR-lejano (en adelante FIR, por sus siglas en inglés, Far-InfraRed, cuyo rango es de 50-200 μ m) al submm-mm (Figura 1.1). Sólo se han podido resolver de 20 a 50 % de las fuentes que crean la emisión conjunta del fondo extragaláctico mm ([95, 7, 55, 13], etc). Las galaxias submm presentan altas luminosidades por lo que se les asocia a las galaxias ultraluminosas en el IR (ULIRG, Ultraluminous IR galaxies) que son sus análogas en el Universo local. Teniendo como modelos a estos objetos cercanos se han podido caracterizar en parte las fuentes submm.

Los modelos de evolución de galaxias están impulsados por las intensas y

Capítulo 1 7

novedosas campañas de observación que permiten llegar cada vez más lejos. Particularmente, los censos sub-mm permiten detectar la luz que proviene de galaxias distantes lo que permite probar directamente los modelos de evolución. Además, la emisión FIR-sub-mm en el marco de referencia en reposo se puede relacionar directamente con la tasa de formación estelar, sin necesidad de utilizar ninguna corrección por extinción [100].

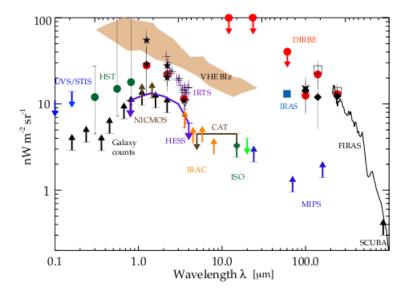


Figura 1.1: Fondo extragaláctico de radiación total observado desde el régimen óptico hasta el IR-lejano. Se puede ver una cantidad comparable de energía entre el FIR (cuyo pico está cerca de las 200 $\mu \rm m$), el cercano-IR/óptico (cuyo pico está entre 1 y 2 $\mu \rm m$) y el submm. Los datos son una compilación de varios autores (imagen tomada de [27])

Se han detectado dos principales fuentes de la radiación submm en las galaxias: emisión térmica proveniente de granos de polvo que constituyen la fase sólida del medio interestelar (en adelante, MI), y líneas de emisión generadas de transiciones atómicas y moleculares del gas interestelar. Ambas ayudan a determinar las propiedades físicas de las regiones de formación estelar (en adelante, FE). Las regiones mejor estudiadas del Universo en la banda submm son las nubes moleculares gigantes de la Vía Láctea, donde se lleva a cabo formación estelar .

8 1.2. Radiación Submm

Casi toda la energía liberada por galaxias en el submm/FIR es generada por la emisión térmica de granos de polvo calentados por alguna fuente cercana de radiación óptica o ultravioleta (en adelante, UV) como estrellas del tipo OB [14] o bien la zona que circunda un AGN (Active Galactic Nuclei, por sus siglas en inglés) [2]. Debido a que las regiones donde se detecta una alta emisión de polvo son ópticamente gruesas en el óptico/UV, las observaciones en estas bandas pueden llegar a ser infructuosas, sin embargo las observaciones en el submm pueden otorgar más información acerca de las condiciones físicas alrededor de la fuente ya que las ondas submm penetran las regiones de gas y polvo denso.

Además el polvo tiene una distribución espectral de energía (en adelante SED, por sus siglas en inglés, $Spectral\ Energy\ Distribution$) bien caracterizada en el régimen submm. Los granos del polvo interestelar en estas galaxias llegan a alcanzar temperaturas típicas que van de 20 a 200 K dependiendo de la intensidad y tipo de radiación, así como del tamaño, composición química, distribución y propiedades ópticas de los granos. Se ha observado que los granos de polvo en las galaxias poseen una distribución de temperaturas dependiendo del entorno y tipos de polvo existentes. La mayor parte de la energía detectada en la banda submm proviene de polvo frío (15-60 K). Precisamente es necesaria la temperatura T_d además de una función de emisividad ϵ_{ν} dependiente de la frecuencia ν para describir la emisión del polvo. Reduciendo a principios básicos, la distribución espectral de energía f_{ν} es de la forma $f_{\nu} \propto \epsilon_{\nu} B_{\nu}$ donde B_{ν} es la función de Planck. Si consideramos un factor de atenuación de la radiación por el MI entonces la SED queda:

$$f_{\nu} \propto [1 - exp(-\tau_{\nu})]B_{\nu} \tag{1.1}$$

donde τ_{ν} es la profundidad óptica de la nube de polvo a frecuencia ν . Para una región ópticamente gruesa $(\tau_{\nu} \gg 1)$, la ecuación 1.1 se simplifica para obtener: $f_{\nu} \propto B_{\nu}$, lo que quiere decir que el polvo se comporta como un cuerpo negro. Para el caso de una región ópticamente delgada donde $\tau_{\nu} \ll 1$, la SED queda como: $f_{\nu} \propto \tau_{\nu} B_{\nu}$, donde la profundidad óptica es de la forma $\tau_{\nu} \propto \nu^{\beta}$ con valores para el índice de emisividad β entre 1 y 2. En este segundo caso se dice que el polvo se comporta como cuerpo negro modificado o cuerpo gris. Por último, el parámetro que relaciona a τ_{ν} con ϵ_{ν} puede ser definido como la frecuencia a la cual $\tau_{\nu} = 1$, o sea en la región de transición de ópticamente delgado a grueso. La ecuación 1.1 es una buena

aproximación y es justamente la que se utiliza en este trabajo.

Es de esperar que las mejores imágenes y espectros en la banda submm existan para galaxias con bajo corrimiento al rojo, de modo que éstas pueden ser usadas como modelos con la ayuda de aproximaciones como la descrita en los párrafos anteriores para interpretar las propiedades de galaxias más lejanas (Figura 1.2). Un claro ejemplo de esto son las ULIRGs. Los ULIRGs se han usado para explicar las galaxias submm lejanas debido a su similitud en algunas propiedades tal como la luminosidad. Desde su descubrimiento en la década de los 80 por el satélite IRAS (*InfraRed Astronomy Satellite*) los ULIRGs se han investigado con interés (por ejemplo [82], [79]) debido a que su luminosidad bolométrica es mayor o del orden de $10^{12}L_{\odot}$, ¹ convirtiéndolas en las más luminosas del universo local.

A mediados de los noventas, observaciones en el FIR hechas con ISO (Infrared Space Observatory) [61] mostraron que la mayoría de la energía liberada por ULIRGs de bajos corrimientos al rojo es generada preferentemente por formación estelar [80, 79] sin embargo la fracción de ULIRGs que contienen AGNs parece crecer a medida de que la luminosidad crece [83], por lo tanto éstos podrían tomar un papel importante a corrimientos al rojo más grandes donde la luminosidad típica de galaxias altamente oscurecidas por polvo es mayor que la del universo local.

La emisión submm-mm, a diferencia de otras longitudes de onda, tiene una corrección K negativa. Esto es, teniendo una luminosidad bolométrica $L_{bol} \sim 10^{12} L_{\odot}$ se tiene un flujo a 1100 μ m de ~ 1 mJy si se observa a cualquier corrimiento al rojo entre 1 y 10. En la figura 1.3 se muestra el efecto considerable que tiene la corrección K a longitudes de onda mayores a 250 μ m. A estas longitudes de onda, para galaxias con corrimientos al rojo mayores que 1, la densidad de flujo ya no decrece con el inverso de la distancia al cuadrado, sino que permanece aproximadamente constante haciéndose casi independiente del corrimiento al rojo para longitudes de onda más largas. Esto nos brinda una herramienta magnífica para registrar galaxias altamente oscurecidas por polvo que tienen altos corrimientos al rojo y que en otras bandas sería casi imposible detectar.

Existen análisis por medio de los cuales es posible inferir rasgos importantes acerca de la población de galaxias lejanas oscurecidas por polvo sin

 $^{^{1}1}L\odot = 3.84 \times 10^{26}W$

10 1.2. Radiación Submm

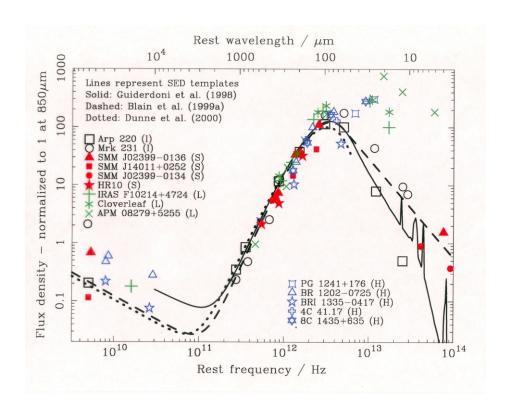


Figura 1.2: Densidad espectral de energía del ULIRG Arp 220. Debido a que esta galaxia es bien conocida (z=0.018 y $L_{FIR}=2 \mathrm{x} 10^{12} L_{\odot}$), los parámetros de Arp220 (T=41.7 K y β =1.3) se usan comúnmente como modelo para ajustar otras SEDs de galaxias más lejanas. (imagen tomada de [14])

la necesidad de obtener detalles de las galaxias individuales involucradas. Tal es el caso de los conteos de fuentes. En la figura 1.4 se muestra una compilación de datos, obtenidos por varios autores [29], utilizados para la estimación del conteo de fuentes a 850 μ m. En este gráfico se puede observar que, para bajas densidades de flujo, se tienen más objetos por grado cuadrado mientras que para densidades de flujo más grandes la cantidad de fuentes decrece. Para el caso de flujos débiles se debe tener en cuenta los problemas por confusión ya que muchos de estos objetos muy cercanos son difíciles de resolver. La confusión de fuentes se refiere a la contribución del ruido a una imagen debido a la superposición de señales provenientes de fuentes débiles muy cercanas que no pueden ser resueltas en la escala del haz de observación (formalmente 1/30 haces, [25]). Por ejemplo, a resoluciones típicas de

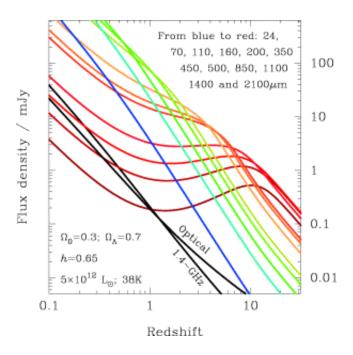


Figura 1.3: Corrección K. Densidad de flujo proveniente de una galaxia con la luminosidad de Arp 220 ($L_{FIR} = 2 \times 10^{12} L_{\odot}$) en función del corrimiento al rojo en las ventanas submm atmosféricas, de arriba hacia abajo: de 24 a 2100 μ m. [14].

10-30 arcsec en los telescopios submm actuales les corresponde una densidad de fuentes aproximadamente de 600 a 6000 fuentes/deg² o un flujo de 1 a 4 mJy en el rango de 850 a 1100 μ m. Esto brinda una indicación de las escalas angulares y frecuencias para las cuales los problemas de confusión son significativos, por lo tanto nos impone un límite en las observaciones (en la figura 1.4 se denota con la línea que está debajo de la leyenda Survey Limit). Nótese que al tener fuentes débiles cerca del límite de confusión no implica necesariamente que sean fuentes lejanas sino que pueden tener bajas luminosidades. Para una buena estimación del conteo de fuentes brillantes, necesitamos cubrir un volumen grande que nos asegure obtener una muestra estadística confiable.

También se muestra en la figura 1.4 la curva que mejor ajusta al conteo de fuentes la cual es generada por dos leyes de potencias (línea sólida). La curva punteada representa el ajuste de los datos a la función de luminosidad de Schechter [86]. Las curvas inferiores (de guiones y sólida) representan el

conteo de fuentes que predice la función de luminosidad a 60 μ m considerando dos modelos cosmológicos ($\Omega_M = 0.3, \Omega_{\Lambda} = 0.7$ y $\Omega_M = 1.0, \Omega_{\Lambda} = 0.0$, respectivamente) sin considerar evolución en luminosidad [91]. Al comparar el modelo analítico de no evolución con los ajustes a los datos queda claro que son inconsistentes demostrando que la población de SCUBA presenta evolución cósmica considerable.

Otro factor que se debe considerar en la detección de galaxias submm son las lentes gravitacionales las cuales amplifican los flujos de los objetos que se encuentran en el fondo [10]. La observación afectada por lentes gravitacionales puede resultar una excelente estrategia para detectar fuentes débiles e investigar tanto sus propiedades individuales como su evolución. [16]. La ventaja al observar galaxias submm afectadas por lentes gravitacionales, es que estas fuentes se ven afectadas además por la corrección K entonces esta combinación favorece la observación de galaxias aún más lejanas.

Desde que SCUBA realizó el primer censo extragaláctico, nuestra forma de entender la formación y evolución de galaxias cambió radicalmente. Con el descubrimiento de una población abundante de galaxias luminosas altamente oscurecidas por polvo con altos corrimientos al rojo y con altas tasas de formación estelar $(SFR \sim 1000 M_{\odot}yr^{-1})$ ([95], [55], [7]), diferentes grupos de investigación se encargaron de realizar importantes censos extragalácticos (< 1 grado cuadrado) durante casi 9 años de operación. Entre ellos: el censo de 8 mJy centrado en los campos ELAIS N2 y Lockman Hole East (LH-E) [91]; SHADES ([37], [30], entre otros) centrado en los campos Subaru-XMM Deep Field (SXDF) y LH-E; Canada-UK Deep Submillimeter Survey ([42], entre otros) y también observó cúmulos de galaxias ([95], entre otros).

El campo HDF-N ($Hubble\ Deep\ Field-North$) es conocido con gran detalle gracias a su amplia cobertura multifrecuencia. El censo submm realizado por [55] con SCUBA a 850 μ m del HDF-N arrojó resultados sorprendentes acerca de la formación de estrellas en galaxias con altos corrimientos al rojo. El trabajo referido demuestra que al hacer la observación en el submm se puede trazar directamente la emisión del polvo que ha sido calentado por estrellas jóvenes masivas, obteniendo una fracción significativa (>80 %) de la actividad de formación estelar del universo temprano que no es detectada en las bandas ópticas y UV por efectos de extinción debido al polvo.

Una extensa variedad de censos complementarios, que incluso se pue-

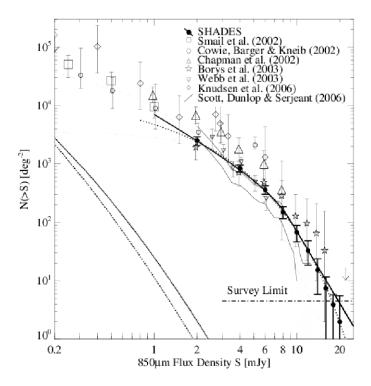


Figura 1.4: Compilación de datos, obtenidos por varios autores [29], utilizados para la estimación del conteo de fuentes a 850 μ m. La curva que mejor ajusta al conteo de fuentes, la cual es generada por dos leyes de potencias, se representa con la línea sólida. La curva punteada representa el ajuste de los datos a la función de luminosidad de Schechter. Las curvas inferiores (de guiones y sólida) representan el conteo de fuentes que predice la función de luminosidad a 60 μ m considerando dos modelos cosmológicos ($\Omega_M=0.3, \Omega_\Lambda=0.7$ y $\Omega_M=1.0, \Omega_\Lambda=0.0$, respectivamente) sin considerar evolución en luminosidad (extraído de [91]).

den intersectar entre ellos, se han hecho con otros detectores en la banda submm-mm. Con MAMBO [63], por ejemplo, se han hecho censos a 1.2 mm en campos como COSMOS [9], GOODS-N [47], ELAISN2 y the Lockman Hole [46]. Con BOLOCAM [44] a 1.1 mm se observaron campos como the Lockman Hole [67] y COSMOS [1]. Con AzTEC (sucesor de BOLOCAM, [104]) se han observado campos a 1.1 mm como COSMOS [90], GOODS-North [77], SHADES [5] y más recientemente Akari Deep Field-South (Hatsukade et al. en preparación) y GOODS-S (datos usados para este trabajo, Scott et al. en preparación), entre otros.

1.3. Galaxias Submm y su relación con otras poblaciones

Con la ayuda de instrumentos como SCUBA y MAMBO se realizaron los primeros censos extragalácticos submm los cuales revelaron la existencia de una población de galaxias muy luminosas con altos corrimientos al rojo, similares en luminosidad o excediendo la de los ULIRGs cercanos. Se sabe que esta población es la responsable de una fracción significativa de la energía liberada en el FIR por todas las galaxias en toda la historia del Universo [13]. En la sección anterior hablamos de los principales mecanismos de producción de la radiación submm así como de los modelos que mejor se ajustan a este tipo de emisión. También hablamos de las ventajas y los problemas que conlleva la observación en esta banda, pero, para entender la naturaleza de las galaxias submm es necesario analizar su relación con otro tipo de galaxias.

Las galaxias submm son un componente importante del Universo, pero al tener normalmente contrapartes muy débiles en otras bandas, su estudio se complica. Para esto, se ha invertido mucho tiempo en los telescopios con el objetivo de detectar ciertas galaxias submm en otras longitudes de onda. Las observaciones sugieren que existen 3 clases de asociaciones entre las galaxias submm y el tipo de posibles contrapartes con las que se pueden relacionar estas galaxias ([56], [96]): Clase 0, son galaxias que tienen contrapartes ópticas y en el NIR extremadamente débiles. La Clase 1 incluye galaxias que son objetos extremadamente rojos (EROs por sus siglas en inglés Extremely Red Objects) los cuales son muy débiles en el óptico pero detectables in el NIR. Finalmente tenemos la Clase 2 que son galaxias relativamente brillantes en ambas bandas. Teniendo estas definiciones podemos darnos una idea

del posible rango de corrimientos al rojo de la galaxia en cuestión. Esto es, si tenemos una fuente clase 2, entonces lo más probable es que ésta tenga bajo corrimiento al rojo.

Una forma muy precisa de determinar las posiciones de las galaxias submm e identificar contrapartes es a través de la obtención de imágenes profundas de interferometría de alta resolución en el radio (por ejemplo, [58]). Existe una correlación muy importante entre las densides de flujo en radio y en FIR de galaxias con bajos corrimientos al rojo [26], la cual puede ayudar a trazar la evolución de la actividad de formación estelar a corrimientos al rojo más grandes. Las galaxias débiles en la banda de radio deben ser detectables en la banda submm si la correlación FIR-radio se mantiene válida a altos corrimientos al rojo. Se piensa que esta correlación es debido a la correspondencia entre la tasa a la cual la radiación óptica/UV proveniente de estrellas jóvenes es absorbida y reemitida como radiación térmica en el FIR por el polvo en regiones de formación estelar, y la luminosidad en radio de las mismas regiones. La luminosidad en radio se debe tanto a la emisión libre-libre en regiones HII como a la emisión sincrotrón generada por electrones relativistas acelerados por choques de supernovas.

Otra manera de determinar contrapartes es por medio de la técnica de interferometría submm la cual fue usada por [105] para hallar contrapartes IR (Spitzer) y radio (VLA) de galaxias submm extraídas del censo COSMOS con AzTEC. La ventaja de esta técnica es que la detección se hace a una longitud de onda similar al descubrimiento original, por lo tanto es más probable la identificación de la contraparte correcta. Se encontró que los flujos en las bandas IR-radio, asociados a fuentes submm, son débiles (debido a la corrección K positiva que tienen estas bandas) lo que significa que las fuentes submm representan una población de galaxias que tienen altos contenidos de polvo y brotes de FE y corrimientos al rojo mayores que las radio-galaxias.

La radiación óptica/UV sufre de extinción debido al polvo, el cual a su vez produce la emisión en MIR-FIR. Debido a esto, pocas galaxias submm han sido estudiadas en las bandas óptica/UV. En particular se ha buscado una asociación entre la población submm con las galaxias tipo *Lyman-break* (LBGs) debido a sus corrimientos al rojo (entre 2 y 4) y con la población de EROs detectados ópticamente. Si los colores extremos de los EROs fueran explicados por tener un alto contenido en polvo se esperaría tener una detección de ellos en el submm. Tanto los LBGs como los EROs muestran agrupamientos al igual que las galaxias submm [56, 98]. Cabe recalcar que

16 1.4. Preguntas clave

los agrupamientos presentados por las galaxias submm las propone como progenitoras de galaxias elípticas masivas ([91]; [38]) favoreciendo el modelo jerárquico de formación de estructura a gran escala del universo ([59], [8]).

Como se ha mencionado antes, la radiación en reposo en el FIR está relacionada con el índice de formación estelar en galaxias. La relación dada por [100] permite estimar la luminosidad en el FIR emitida a altos corrimientos al rojo a partir de la radiación submm que detectamos:

$$SFR[M_{\odot}yr^{-1}] \sim 10^{-10} \frac{L_{FIR}}{L_{\odot}}$$
 (1.2)

Además de las bandas en el óptico/IR y radio, la observación en rayos X o gamma también pueden proporcionar información complementaria de las galaxias submm. Por ejemplo, los GRBs (por sus siglas en inglés, Gammaray burst) de larga duración, ocurren con la muerte de estrellas masivas. Estos eventos son lo suficientemente brillantes como para ser detectados a altos corrimientos al rojo, incluso en ambientes con gran contenido de polvo, por lo que son una poderosa herramienta para medir la historia de formación estelar global del universo [64]. Dado que la radiación submm también tiene correlación con el índice de formación estelar, entonces la tasa de GRBs debe estar relacionada con la tasa de formación de estrellas masivas [99]. Por otro lado, la observación en rayos X nos permite averigüar si las altas luminosidades alcanzadas por las galaxias submm son debidas a la actividad de AGNs [2]

1.4. Preguntas clave

La primera generación de censos extragalácticos en el submm han complementado nuestra visión actual del Universo. Gracias a ellos, se ha descubierto una gran población de galaxias lejanas muy luminosas, dominadas por polvo. Estas fuentes se han propuesto tentativamente como progenitoras de las galaxias elípticas locales debido a que presentan altas tasas de formación estelar y grandes agrupaciones [91, 11]. Para estudiar con más detalle estos objetos es necesario un análisis multifrecuencia de grandes regiones del cielo.

Con el objetivo de responder algunas de las principales preguntas planteadas se han diseñado nuevos censos extragalácticos en las bandas submmmm sobre diferentes regiones o campos en el cielo con el fin de entender

mejor las distribuciones de corrimientos al rojo, funciones de luminosidad, historia de formación estelar y la medida de agrupamiento de estas poblaciones, entre otros.

Existen varias cuestiones sin una respuesta explícita, algunas de las cuales son: ¿Cómo se formaron las galaxias masivas y sus poblaciones estelares? ¿Qué etapa evolutiva representan las galaxias submm? ¿Cuál es la distribución de corrimientos al rojo de estas galaxias? ¿Cuál es su agrupamiento y la evolución de éste? ¿Cómo se forman y evolucionan los cúmulos de galaxias? ¿Cómo se forma y evoluciona la estructura a gran escala del Universo?

El proyecto que se propone en este documento no pretende hallar las respuestas a todas las cuestiones antes mencionadas, sin embargo, el objetivo se relaciona con todas ellas y se busca dejar un precedente para futuros trabajos. En específico esta tesis se centra en la explotación de datos BLAST y AZTEC a corto plazo, y a mediano plazo los datos Herschel y GTM, con el objetivo de reconstruir la historia de galaxias en formación y detectar la cola de la distribución a altos corrimientos al rojo. Como se ha explicado a lo largo de este capítulo, la radiación proveniente de galaxias lejanas altamente oscurecidas por polvo se detectan en la banda submm-mm, y es justamente por esta razón que la observación en estas bandas nos proporciona la oportunidad de echarle un vistazo al universo temprano, y por lo tanto a las galaxias progenitoras de las que hoy conocemos. En el siguiente capítulo se hablará con más detalle acerca de los datos que sostienen este trabajo así como algunas de las herramientas para llevar a cabo el análisis de las fuentes submm.

1.4. Preguntas clave

Importancia de la combinación de datos submm-mm con otras bandas

En el capítulo anterior se mencionaron algunos de los principales censos submm que han descubierto objetos que se encuentran a altos corrimientos al rojo $(z \gg 1)$ y que pueden representar las primeras etapas evolutivas de las galaxias. Gracias a grandes censos como SHADES se sabe que las galaxias submm son una población masiva con alto contenido en polvo [40]. La mediana de la distribución de corrimientos al rojo de las galaxias submm es de ~ 2.4 , con aproximadamente el 50 % de la población a 1.8 < z < 3.1[22, 3, 23, 4]. Sin embargo, hacen falta datos de campos más extensos para delimitar las propiedades de las galaxias submm como la tasa de FE, conteo de fuentes y la distribución de corrimientos al rojo y de luminosidades, sin recurrir a las identificaciones en radio que pueden sesgar las distribuciones. En específico, la combinación de los datos obtenidos por AzTEC a 1.1 mm y los datos de BLAST a 250, 350 y 500 μ m en la región de GOODS-S y de SEP nos brindan la oportunidad de lograr esto (por ejemplo, [53]). La figura 2.1 muestra un ejemplo de una de las posibles combinaciones de los colores submm pertenecientes a 424 galaxias detectadas simultáneamente por los 3 filtros de BLAST de un censo simulado, para estimar corrimientos al rojo fotométricos [54]. Del diagrama se puede observar que los colores empleados son buenos indicadores de corrimientos al rojo.

Desde el descubrimiento de una población significativa de fuentes submm débiles, las estrategias para el diseño de censos se han ido modificando según

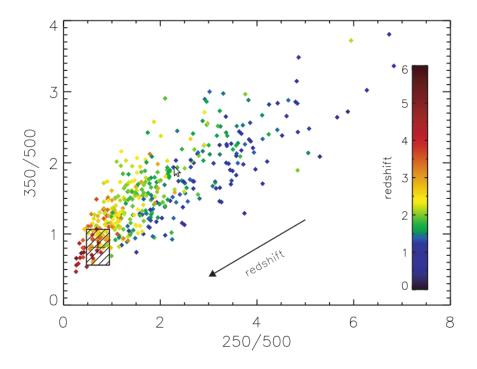


Figura 2.1: Diagrama Color-color (350 μ m/500 μ m versus 250 μ m/500 μ m) versus la distribución de corrimientos al rojo para 424 galaxias detectadas simultáneamente por los 3 filtros de BLAST de un censo simulado considerando errores observacionales. La cruz negra marca la posición que le corresponde a una galaxia de $4\times10^{12}L_{\odot}$ con un corrimiento al rojo de 2.81. La región rayada que encierra el rectángulo representa el error a 1σ de los colores medidos [54].

el caso científico. La densidad de flujo mínima detectada depende del tiempo de integración, del área que cubre el censo y de las características del instrumento y del telescopio [12], lo que significa que un censo profundo puede llegar a ser muy caro si no se tiene una buena estrategia. Por otro lado, el gráfico de conteo de fuentes (Figura 1.4) nos ayuda también a desarrollar buenas estrategias que maximicen la probabilidad de detectar galaxias con grandes corrimientos al rojo [12].

Los censos profundos de campos sin sesgo en la banda submm son necesarios para construir el extremo del gráfico de conteo de fuentes (Figura 1.4) correspondiente a objetos débiles mientras que los censos extensos ayudan a calcular el extremo correspondiente a objetos brillantes. Por esta razón es im-

portante producir mapas submm a través de las dos estrategias mencionadas. Juntas delimitan los distintos escenarios evolutivos de las galaxias submm. Para este fin, AzTEC aportó un mapa profundo de la región GOODS-S (con un nivel de ruido de 0.48-0.73 mJy/haz, Scott et al. en preparación) y BLAST contribuyó con un mapa profundo (con un nivel de ruido uniforme alrededor de 11, 9 y 6 mJy/haz para 250, 350 y 500 μ m, respectivamente) y un mapa extenso (con un nivel de ruido uniforme alrededor de 30, 26 y 20 mJy/haz para 250, 350 y 500 μ m, respectivamente) para la misma región en cada banda [33].

Tanto el equipo de BLAST como el de AzTEC escogieron observar el campo GOODS-South debido a que existen observaciones a otras longitudes de onda realizadas por 4 importantes telescopios espaciales de la NASA: Hubble Space Telescope (HST) en el visible, Spitzer Space Telescope (formalmente SIRTF, the Space Infrared Telescope Facility) en el IR, Compton Gamma-Ray Observatory en rayos gamma y por último Chandra X-Ray Observatory (CXO) en rayos X. Como se mencionó en el capítulo anterior, al combinar los datos submm con otros datos multifrecuencia podemos obtener más información acerca de las propiedades de las galaxias en formación. En el capítulo 3 se hablará con más detalle acerca de algunas técnicas para identificar y relacionar la población submm con otras.

En las siguientes secciones se explicará la importancia de observar hacia el campo SEP y en qué consiste el proyecto GOODS así como su relevancia por incluir observaciones multifrecuencia. Más adelante se desarrollarán los proyectos en los que han participado AzTEC y BLAST, y se dará información acerca de los telescopios. Las últimas secciones se enfocan en los dos telescopios que eventualmente proporcionarán datos para extender el análisis de la primera fase de trabajo: El Gran Telescopio Milimétrico y Herschel

2.1. The Great Observatories Origins Deep Survey: GOODS

El proyecto GOODS (http://www.stsci.edu/science/goods/, [34]) fue diseñado con el objetivo de recolectar los mejores datos multifrecuencia para estudiar la formación y evolución de las galaxias y AGNs, la distribución de la materia bariónica y oscura con altos corrimientos al rojo, los parámetros cosmológicos de supernovas lejanas y el fondo de radiación extragaláctico.

El censo abarca dos campos importantes: Hubble Deep Field North y Chandra Deep Field South (CDF-S), cada uno de 10x16 arcmin². El campo GOODS-South o CDF-S está centrado en RA = 03hrs 32min 30sec y Dec = -27deg 48min 20sec. y HDF-N o bien GOODS-N está centrado en RA=12hrs 36min 55sec y DEC=+62deg 14min 15sec. El concepto del programa de los grandes observatorios fue desarrollado a mediados de los 80 por astrofísicos de la NASA para tener observaciones contemporáneas de un mismo objeto a diferentes longitudes de onda, facilitando así su estudio.

GOODS reúne las observaciones fotométricas y espectroscópicas más profundas y mejor resueltas de los grandes observatorios espaciales de la NASA (Spitzer, Hubble, Chandra y Compton Gamma-Ray Observatory), además de los telescopios más poderosos montados sobre la superficie terrestre.

El primer telescopio espacial del programa es el Hubble puesto en órbita a principios de los noventas el cual ha observado GOODS en 4 bandas que van desde el visible hasta el cercano-IR (filtros B, V, i y z), permitiendo estudiar la población de LBGs, las estrellas galácticas de baja masa y lentes gravitacionales.

El segundo gran observatorio es el Compton Gamma-Ray Observatory, puesto en órbita desde 1991 hasta el año 2000. Brinda imágenes de las regiones más energéticas del universo como vientos solares, brotes de rayos gamma, pulsares, explosiones supernova, discos de acreción de agujeros negros, entre otros, en el rango de 30 keV a 30 GeV.

El tercer miembro del programa es el telescopio espacial Chandra, puesto en órbita desde 1999. Detecta la emisión de regiones muy calientes como agujeros negros, cuasares y cúmulos de galaxias, teniendo sensibilidad a la región del espectro electromagnético que va desde 0.1 a 10 keV.

El telescopio espacial Spitzer, puesto en órbita desde el 2003, es el cuarto y último miembro de los grandes observatorios. Aporta datos en el campo de GOODS en 5 bandas IR (de 3.6 a 24 μ m) permitiendo detectar regiones de formación estelar, los centros de las galaxias, sistemas planetarios en formación y los objetos más frios del espacio que no son detectables desde la superficie terrestre.

El programa de los grandes observatorios ha tenido un gran impacto en la

comunidad científica. Cada uno de los 4 telescopios ha dejado un gran legado y gracias a ellos se han hecho grandes descubrimientos. La combinación de las observaciones incluidas en el programa permiten obtener astrometría más precisa en otras bandas, identificación de contrapartes, calcular corrimientos al rojo fotométricos ópticos/IR, estimar la historia global de formación estelar, estudiar la evolución de AGNs, entre otros.

En la banda subm
m los telescopios BLAST y ASTE (AzTEC) se encargaron de complementar las observaciones de GOODS-S a 250, 350, 500 y 1100 μ m. En la figura 2.2 se muestran las áreas cubiertas por AzTEC y BLAST del campo GOODS-S. AzTEC cubre 0.056 grados cuadrados, intersectándose con la región central profunda de los mapas de BLAST, que cubren un área total de 9 grados cuadrados en las 3 bandas.

2.2. South Ecliptic Pole: SEP

SEP o polo sur eclíptico es uno de los dos puntos en la esfera celeste donde la esfera se intersecta con la línea imaginaria perpendicular al plano eclíptico. El polo norte eclíptico está en la dirección de la constelación del dragón o Draco y el polo sur eclíptico está en la dirección de la constelación El Dorado. Por definición, los polos eclípticos se localizan a 90 grados de la posición del sol de forma que cuando alguno de los polos eclípticos esté en el zenith, el sol debe estar en el horizonte.

Las coordenadas del polo sur eclíptico son RA=04hrs 44min 00sec y Dec=-53deg 20min 00sec. y la región del cielo que lo rodea se caracteriza por tener bajo contenido de cirrus (polvo+HI) lo que facilita la observación de objetos más lejanos. La gran cobertura multifrecuencia de este campo facilita la identificación de las fuentes submm convirtiéndolo en una herramienta que permite complementar la descripción de las propiedades de las galaxias oscurecidas con altos corrimientos al rojo.

La región de SEP ha sido observada por importantes telescopios, además de BLAST y ASTE (AzTEC) (Figura 2.3). Uno de ellos es el satélite espacial japonés ASTRO-F [94] o bien conocido como AKARI (luz en japonés) puesto en órbita a principios del 2006. Tiene un telescopio Ritchey-Chretien de 68.5 cm con dos instrumentos: IRC (*InfraRed Camera*) que observa en el IR-cercano/intermedio y FIS (*Far-Infrared Surveyor*) que observa en el

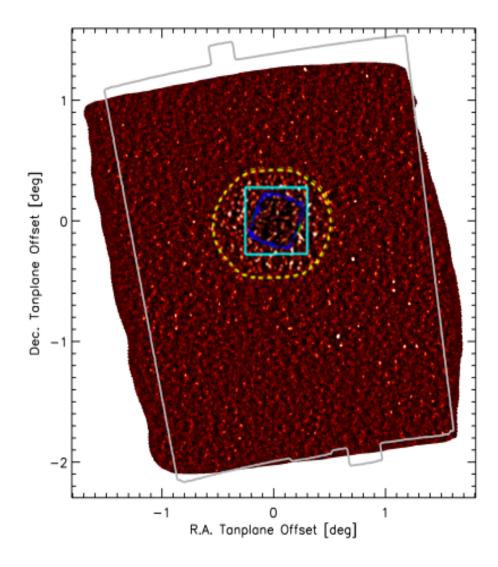


Figura 2.2: Áreas cubiertas por algunos de los principales telescopios para el campo de CDF-South. El mapa de fondo pertenece al campo extenso de BLAST (9 grados cuadrados en cada una de las 3 bandas). El contorno gris claro pertenece a Spitzer con SWIRE. La línea punteada amarilla encierra el campo profundo de BLAST. El contorno azul claro abarca las áreas cubiertas por Chandra, VLA, FIDEL y LABOCA. El contorno azul oscuro encierra el área que cubre AzTEC. (imagen tomada de http://www.blastexperiment.info/scienceexgal.php).

FIR. Posee mejor sensibilidad, resolución espacial y una cobertura de frecuencias más amplia que IRAS. El censo de SEP realizado por este telescopio cubrió un área de aproximadamente 15 deg² en el rango de 50 a 180 μ m [72].

Finalmente se escribió una propuesta exitosa del grupo en el que colaboro para obtener datos con el telescopio espacial Spitzer y ya se ha cubierto un área de 10 deg² en el rango de 24 and 70 μ m para complementar las observaciones antes mencionadas. Próximamente el campo de SEP será observado por el telescopio Herschel, ya que es parte del proyecto HerMES (Herschel Multi-tiered Extragalactic Survey, se explicará en la sección 2.6).

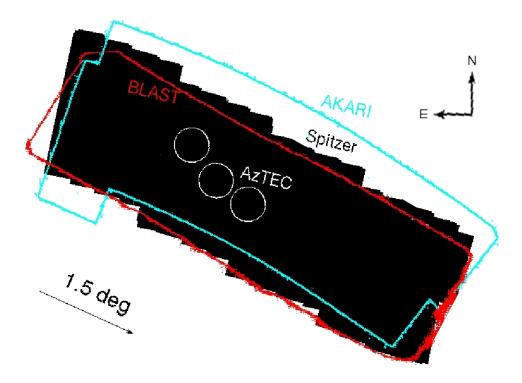


Figura 2.3: Áreas que cubren los distintos telescopios en el campo de SEP.

2.3. The Balloon-borne Large Aperture Submillimeter Telescope: BLAST

El experimento submm BLAST, o bien el Telescopio Submilimétrico de Gran Apertura a Bordo de un Globo (Figura 2.4, [74]), es un telescopio Cassegrain de 2-m, montado en un globo que sobrevuela la estratósfera (~ 40 km de altura), diseñado para estudiar la formación y evolución de estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias, produciendo los primeros mapas extensos de 250 a 500 μ m (coberturas de ~ 0.8 -200 deg^2). Observa el cielo con 270 bolómetros distribuidos en 3 arreglos que operan simultáneamente a 250, 350 v 500 µm obteniendo resoluciones de 30, 42 v 60 arcsec, respectivamente. La principal ventaja de observar a estas bandas es que se puede registrar el pico de la radiación térmica emitida por el polvo en galaxias con altos corrimientos al rojo. Se espera observar con este telescopio poblaciones con corrimientos al rojo de 1 a 5. Con una sensibilidad de 250 $mJys^{1/2}$, la velocidad de cartografía de BLAST es 10 veces mejor que la de SCUBA 2 (sucesor de SCUBA, [50]) a 500 μ m y esto es debido a la altura que alcanza durante su vuelo. BLAST también ha permitido probar los detectores y filtros que son similares a los usados en SPIRE, instrumento del satélite Herschel, así que puede influenciar la estrategia de los futuros censos hechos con SPIRE.

Los principales objetivos de BLAST son: (i) realizar censos de cobertura amplia para delimitar la distribución de corrimientos al rojo, la historia de formación estelar y la evolución de galaxias altamente oscurecidas por polvo, por medio del cálculo de corrimientos al rojo fotométricos (derivados de la combinación de los datos obtenidos en las 3 bandas de BLAST, [53]); (ii) estudiar el agrupamiento de estas poblaciones [102]; (iii) mejorar nuestro entendimiento acerca de las etapas más tempranas de formación de las estrellas por medio de la determinación de la eficiencia de formación estelar y en general, de las propiedades físicas considerando diferentes ambientes; y por último, (iv) investigar la naturaleza y la estructura del MI galáctico por medio de la generación de mapas con alta resolución.

BLAST ha realizado 3 vuelos hasta el momento. El primero fue uno de ingeniería llevado a cabo el 28 de septiembre de 2003 (BLAST03) en Fort Sumner, Nuevo México (EUA), culminando exitosamente después de 24 horas de vuelo. Dos años más tarde, en junio de 2005 (BLAST05), realizó su primer vuelo científico de 4.5 días alcanzando un altura promedio de 38 km, esta vez desde Kiruna, Suecia, por encima del Círculo Polar Ártico, entre



Figura 2.4: Telescopio Submilimétrico de Gran Apertura a Bordo de un Globo: BLAST. Imagen tomada del sitio oficial http://www.blastexperiment.info/

Suecia y Alasca, aterrizando en la isla canadiense de Victoria en el Ártico. BLAST05 adquirió solamente datos de objetos galácticos, después de 100 horas, debido al mal funcionamiento del sistema óptico que le ocasionó un decremento en la resolución y sensibilidad. Sin embargo este vuelo aportó los primeros mapas extensos en las 3 bandas antes mencionadas [21]. Después de resolver los problemas del sistema óptico, BLAST realizó su segundo vuelo científico de 250 horas el 20 de diciembre de 2006 (BLAST06) partiendo desde la estación McMurdo en la costa de Antártica. BLAST06 observó los campos Chandra Deep Field South o GOODS-S, y una región cercana al polo sur eclíptico (SEP, por sus siglas en inglés South Ecliptic Pole), detectando cientos de objetos en un área de aproximadamente 10 grados cuadrados para ambos censos. También observó objetos galácticos y extragalácticos (Figura 2.5). Toda la información acerca de BLAST, incluyendo la descripción del telescopio y del sistema óptico, así como su funcionamiento en general, se encuentra en [74]

Se han identificado contrapartes en el radio y/o en el mediano-IR de 226 fuentes detectadas en GOODS-S en las 3 bandas de BLAST [40]. Estas fuentes muestran valores de corrimientos al rojo y temperaturas del polvo significativamente bajos (la mediana de la distribución de corrimientos al rojo es de 0.7 y para la temperatura es de 26K) , comparados con los de las galaxias submm detectadas por SCUBA ([4], [40]). También se encontró que el 60 % del fondo cósmico de radiación IR a 500 μ m es generado a z>1.1 mientras que la emisión a 70 μ m es más reciente con el 75 % de ésta generada a z<1.1 ([33], [75]).

2.4. Astronomical Thermal Emission Camera: Az-TEC

La cámara AzTEC [104] es un instrumento diseñado para el Gran Telescopio Milimétrico de 50-m ubicado en la cima del Volcán Sierra Negra, en Puebla, México. La radiación se acopla a 144 bolómetros de Si-Ni dispuestos en paquetes hexagonales compactos que operan a 1.1 ó 2.1 mm, . El dispositivo obtiene imágenes completamente muestreadas mediante movimientos del telescopio o del espejo secundario. El antecesor de AzTEC es el instrumento BOLOCAM [44] instalado en el telescopio submm de Caltech con 10.4-m de diámetro en Mauna Kea, Hawaii. En junio de 2005, AzTEC fue instalada y probada exitosamente en el telescopio de 15-m JCMT (James Clerk Maxwell Telescope) ejecutando un extensa campaña de observaciones científicas a 1.1 mm desde noviembre de 2005 hasta febrero de 2006 (JCMT05). En 2007 el instrumento fue reinstalado en el telescopio de 10-m ASTE en el cual se realizó una segunda (ASTE07) y tercera campaña (ASTE08) de observación (figura 2.6) . Se espera que AzTEC sea instalada en el GTM a finales de 2010.

El tamaño del haz a 1.1 mm es de 18 arcsec para el JCMT, 28 arcsec para ASTE y 5 arcsec para el GTM. La información acerca del diseño y funcionamiento de AzTEC está publicada en [104].

AzTEC alcanzó velocidades de cartografía de hasta 30 arcmin² hr⁻¹ mJy⁻² en el sitio del JCMT con valores de opacidad a 225 GHz alrededor de 0.1 [104]. La campaña de observación JCMT05 incluyó los campos sin sesgo de COSMOS (0.3 deg²; [90]),SHADES (0.5 deg²; [5]) y GOODS-N (315 deg²; [77]) obteniendo censos con una sensibilidad en el rango de 0.96-1.16

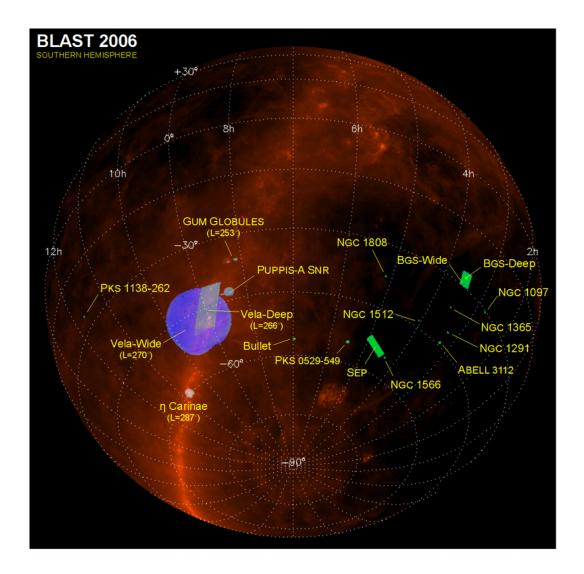


Figura 2.5: Regiones del cielo extragaláctico observadas desde el hemisferio sur por BLAST06. Los colores de las regiones indican la cantidad de tiempo de observación, esto es, verde representa más tiempo de observación (mapa más profundo), mientras que el color azul representa menos tiempo de observación (mapas más extensos). Las regiones están sobrepuestas en un mapa (IRAS + DIRBE) de la emisión galáctica del polvo a $100~\mu m$ que está de color rojo. BGS significa BLAST GOODS-S. Imagen obtenida del sitio oficial de BLAST (http://www.blastexperiment.info/index.php).





Figura 2.6: A la izquierda, Telescopio japonés de 10-m ASTE ubicado en el desierto de Atacama en el norte de Chile. A la derecha, la cabina receptora de AzTEC en ASTE. El sitio oficial de ASTE es http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/ \sim kkohno/ASTE/y el de AzTEC es http://www.astro.umass.edu/AzTEC/

mJy/haz, entre otros censos extragalácticos y galácticos.

Las campañas de observación ASTE07/08 incluyeron regiones galácticas de formación estelar y campos sin sesgo extragalácticos como GOODS-S, SEP y campos centrados en radio galaxias o cúmulos de galaxias con corrimientos al rojo entre 0 < z < 6. Estos dos últimos ambientes conforman el censo ACES (por sus siglas en inglés, AzTEC/ASTE Cluster Environment Survey) el cual es el más grande realizado por este instrumento. Su objetivo es estudiar la población de galaxias con brotes estelares y con altos contenidos de polvo que se encuentran tanto en los cúmulos como detrás de ellos.

A futuro se espera que con AzTEC en el GTM (Figura 2.7) se puedan entender mejor los procesos físicos que crean la estructura y evolución del universo. El GTM será capaz de investigar temas tan diversos como la constitución de los cometas y las atmósferas planetarias, la formación de los planetas extrasolares, el nacimiento y evolución de las estrellas, el crecimiento jerárquico de galaxias y de cúmulos de galaxias y su distribución a gran escala, así como la radiación cósmica de microondas y sus anisotropías.

Será por varios años uno de los telescopios más grandes y sensibles de la banda milimétrica. La combinación de una gran área colectora y un amplio campo de visión (de 8 minutos de arco de diámetro) le brindan al GTM altas velocidades de cartografía. Dicha ventaja será explotada en conjunción con la instrumentación de primera luz, que incluye varias cámaras de continuo (entre ellas AzTEC) e instrumentos heterodinos.



Figura 2.7: Gran Telescopio Milimétrico (http://www.lmtgtm.org/gtm/outreach.html).

2.5. Gran Telescopio Milimétrico/AzTEC

El Gran Telescopio Milimétrico (o Large Milimeter Telescope, [87]) es una antena de 50-m de diámetro que se encarga de observar el cielo en la banda milimétrica (0.85 mm< λ <4 mm). El GTM se está construyendo en la cima del Tliltépetl, también llamado Volcán Sierra Negra, situado a 100 km al este del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), en el estado de Puebla a una altitud de 4580 m y una latitud de +19 grados, lo cual permite el traslape con una gran parte del hemisferio sur que puede ser visto por ALMA. El sitio posee las condiciones atmosféricas que permiten la detección de la radiación mm durante todo el año. El proyecto es resultado de la colaboración entre México (encabezada por el INAOE) y Estados Unidos (encabezada por la Universidad de Massachusetts, UMass).

El GTM se ha venido desarrollando desde 1994 y se espera que para principios del año 2010 ya esté listo para ofrecer las primeras observaciones científicas. La antena está al aire libre. El diseño del telescopio incluye un espejo primario formado por 180 segmentos o páneles distribuidos en 5 anillos concéntricos cuyas posiciones serán controladas mediante 720 actuadores (4

Instrumento	Descripción	Banda	Aplicación Principal	Estado
AzTEC	Cámara bolométrica de 144	1.1,1.3,2.1 mm	Emisión de polvo de galaxias a	Completo
	pixeles		alto redshift	
Buscador de	Receptor de banda ancha	73-111 GHz	Corrimientos al rojo	Completo
corrimientos al	con cobertura espectral de		espectroscópicos de galaxias	
rojo	38 GHz		distantes	
SEQUOIA	Arreglo de plano focal	85-115.5 GHz	Líneas moleculares de emisión de	Completo
	heterodino		galaxias y regiones de formación	
			estelar	
SPEED	Arreglo bolométrico de 4×4	0.85, 1.1, 1.4, 2.1 mm	Efecto S-Z, SED de galaxias,	Etapa final
	de frecuencia selectiva		protoestrellas, asteroides,	de
			cometas	construcción
Receptor de	Receptor de un solo pixel	220-275 GHz	Líneas de emisión de galaxias,	En
1mm	de doble polarización		regiones FS, cometas	construcción
Espectrómetro	Espectrómetro genérico	-	Soporta cualquier programa	En
de banda	para arreglos de plano focal		espectroscópico	construcción
ancha				

Cuadro 2.1: Primera generación de instrumentos en el GTM

por segmento) para contrarrestar las deformaciones de la superficie debido al viento o a la gravedad. Tiene un campo de visión de 8 minutos de arco de diámetro, además será el telescopio con mayor sensibilidad, ideal para detectar la emisión de bajo brillo superficial, con una resolución angular de 4.2 a 14.8 arcsec entre 0.85 y 3 mm. Tendrá un límite de confusión bajo (0.06 mJy a 1 mm) y cuando AzTEC se haya instalado exitosamente, se espera resolver todo el fondo de radiación mm en galaxias individuales [20]. En la figura 2.8 se indican las sensibilidades requeridas, las áreas de los censos propuestos y el fondo correspondiente que podría resolver el GTM con AzTEC a 1.1 mm, en comparación con los censos hechos por SCUBA con el JCMT. La velocidad de cartografía (2013 arcmin² hr⁻¹ mJy⁻² con AzTEC) y la resolución que permite la antena junto con los intrumentos de detección ubican al GTM en un lugar privilegiado para hacer descubrimientos e investigación durante la próxima década.

Algunos de los primeros instrumentos del GTM ya han sido probados en otros telescopios demostrando un desempeño adecuado a los requerimientos. En la tabla 2.1 se muestra un resumen de los instrumentos diseñados para el GTM [20].

Se podrán realizar observaciones detalladas tanto de la Vía Láctea como de galaxias tal como eran en la época en que se formaron. Se podrán realizar medidas de la estructura del fondo de radiación cósmica y ampliará

Capítulo 2

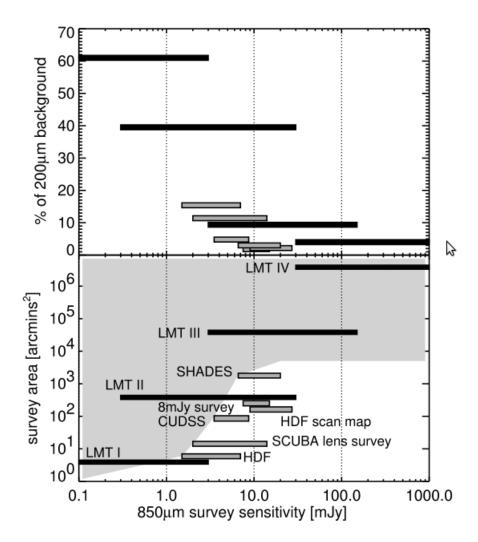


Figura 2.8: Áreas de los censos propuestos y el fondo correspondiente que podría resolver el GTM con AzTEC a 1.1 mm vs. las sensibilidades requeridas a 850 μ m, en comparación con los censos hechos por SCUBA con el JCMT [52]. Los rectángulos de color gris claro representan el rango de profundidad y áreas cubiertas por los censos con SCUBA. Los rectángulos negros representan los censos propuestos para el GTM. El área sombreada señala la región todavía sin explorar respecto a los parámetros graficados.

la información del proceso de formación estelar. Además permitirá el acceso al medio ambiente de los AGNs y dará seguimiento a los destellos de rayos

gamma para complementar nuestra visión acerca de la muerte de estrellas masivas y el origen de los elementos químicos más pesados. En astrobiología, la búsqueda de moléculas orgánicas complejas en el espacio será posible con el GTM [20].

La ciencia a mediano plazo del GTM descansa en los instrumentos de la próxima generación. Se espera que a mediados de la próxima década el GTM adquiera 3 instrumentos adicionales: 1) TolTEC (Large Format Bolometer Camera), es un arreglo de bolómetros con ~ 5000 píxeles que mejorará la capacidad de cartografía entre 12 y 20 veces la de AzTEC; 2) CIX (Cluster Imaging Experiment) es un arreglo de 256 detectores con el cual se podría estudiar la estructura interna de los cúmulos de galaxias, mediante observaciones del efecto Sunyaev-Zel'dovich en 4 bandas (0.85, 1.1, 1.4 y 2.1 mm). 3) Por último está el detector heterodino Cluster Feed Heterodyne Array el cual es un arreglo de ~ 100 píxeles para hacer espectroscopia a 1 mm, sucesor de SEQUOIA.

2.6. Herschel/SPIRE

Herschel (http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=16), nombrado así en honor a William Herschel, quien descubrió la radiación IR en 1800, es un observatorio espacial que incluye un telescopio Cassegrain diseñado con un espejo primario de 3.5-m de diámetro y un secundario de 0.3-m para cubrir las longitudes de onda del FIR al submm (55 a 672 μ m). Realizará observaciones que no son posibles desde telescopios instalados sobre la superficie terrestre. Fue lanzado al espacio el 14 de mayo de 2009 junto con el satélite Planck (destinado a estudiar el CMB), quedando en su órbita a 1.5 millones de km de la Tierra. La órbita de Herschel, en la posición del segundo punto lagrangiano del sistema Tierra-Sol, ayuda a evitar problemas causados por la radiación IR de la Tierra. También evita los cambios de temperatura que vienen de la presencia y ausencia de la luz solar ya que se encuentra en una dirección diametralmente opuesta al sol. Esto ayuda a la estabilidad térmica de los instrumentos.

Herschel estudiará la formación y evolución de las estrellas tempranas así como de las galaxias a lo largo de la vida del Universo. Además estudiará la química de nuestra galaxia y de las atmósferas de planetas, cometas y satélites del sistema solar. Su tiempo de vida operacional es de 3 años con

Capítulo 2 35

la posibilidad de extenderse un año más y se espera que logre 7000 horas de observación al año.

El observatorio tiene acceso a 3 instrumentos: HIFI (Heterodyne Instrument for the Far Infrared) es un espectrómetro heterodino de muy alta resolución. Cubre dos bandas: 480-1250 GHz y 1410-1910 GHz; PACS (Photodetector Array Camera and Spectrometer) obtendrá tanto imágenes como espectros de mediana resolución. Opera simultáneamente en dos bandas: 60-130 y 130-210 μ m; por último está el detector SPIRE (Spectral and Photometric Imaging Receiver; [48]) que es un espectómetro de transformada de Fourier.

SPIRE observará simultáneamente en 3 bandas: 250, 350 y 500 μ m, lo cual permitirá comparar directamente los datos con BLAST a mayor resolución. Más de 1000 horas serán destinadas a detectar el universo con alto corrimiento al rojo y galaxias locales, esto incluye censos de campos sin sesgo que ayudarán a caracterizar la evolución de la densidad de luminosidad bolométrica del universo temprano. Los mismos campos que han sido o serán cubiertos por Spitzer, SCUBA-2 y censos en el IR-cercano, son los que serán seleccionados para observar, facilitando la identificación de fuentes y permitiendo estudios más detallados de los corrimientos al rojo, SEDs y otras propiedades de las galaxias detectadas. Además se hará un censo de más de 300 galaxias locales y un estudio del MI en ambientes de baja metalicidad.

Herschel incluye en su programa de observación dos grandes proyectos: HerMES (*The Herschel Multi-tiered Extragalactic Survey*, [41]) y ATLAS (*Astrophysical Terahertz Large Area Survey*, [41]). HerMES es un conjunto de seis censos anidados con el propósito de estudiar la historia de formación estelar durante los últimos 10 mil millones de años. ATLAS es un censo de 600 deg², cinco veces más grande que todos los censos combinados de Herschel, el cual tiene múltiples objetivos cosmológicos. De este último proyecto se espera obtener datos debido a la colaboración de mi grupo de investigación.

Pues bien, en los dos capítulos anteriores se ha desarrollado el gran progreso que ha tenido la astronomía submm en las últimas décadas. Debido a que la observación en esta banda favorece la investigación de las etapas más tempranas del Universo, las fuentes submm son fundamentales para entender la formación y evolución de las galaxias masivas. Se requiere producir y combinar datos a diferentes longitudes de onda para identificar contrapar-

tes más confiables, determinar corrimientos al rojo más precisos y medir la contribución al fondo de radiación extragaláctico de las fuentes, entre otros, con la ayuda de telescopios cada vez mejores. Para realizar un análisis de los datos con un nivel de confianza aceptable se necesitan técnicas estadísticas robustas. En el siguiente capítulo se explicarán algunas de ellas.

Capítulo 3

Técnicas estadísticas para el análisis de datos

En este capítulo se explicarán las técnicas que se han implementado hasta el momento en el lenguaje de programación IDL para extraer la señal de galaxias submm a 250, 350, 500 y 1100 μ m detectadas por BLAST [33] y AzTEC/ASTE (Scott et al. en preparación) en el campo sin sesgo GOODS-S. Para el análisis individual de las fuentes, a partir de los catálogos obtenidos de los mapas en cuestión, se han creado estampas de una misma fuente a diferentes longitudes de onda con el fin de visualizar las posibles contrapartes.

También se mencionarán las principales técnicas para estimar corrimientos al rojo, luminosidades y tasas de formación estelar, con las cuales se intentará caracterizar la población sub-mm en el futuro.

3.1. Análisis de contrapartes

La identificación de fuentes en varias longitudes de onda complementa las propiedades individuales de las galaxias detectadas en una sola banda, pero la búsqueda no es una tarea fácil. Para poder asignar una contraparte a una fuente se deben tener en cuenta algunos requisitos como que los mapas tengan buena astrometría para evitar errores de asociación. La figura 3.1 muestra la imagen centrada en las coordenadas de un objeto de interés y simultáneamente las imágenes en otras bandas centradas en las mismas coordenadas.

Existen dos métodos para la selección de contrapartes, el primero es la estadística P o de Poisson. El procedimiento se presenta en [89] y una aplicación de éste se da en [90]. Presentamos un ejemplo a continuación. La probabilidad de que el vecino más cercano de una fuente dada caiga dentro de una distancia θ esta dada por:

$$P(\theta) = 1 - e^{-n\pi\theta^2} \tag{3.1}$$

donde n es el número de fuentes en el mapa. En [90] se empleó la estadística P para identificar las contrapartes VLA (1.4 GHz) de la población de galaxias detectadas a 1.1 mm con AzTEC en el campo COSMOS. Se obtuvo una probabilidad de 4.5 % con un radio de búsqueda de 9 arcsec sugiriendo que sólo el 4.5 % de las fuentes de radio identificadas en un radio de 9 arcsec alrededor de una fuente AzTEC son falsas asociaciones. El radio de búsqueda de las posibles contrapartes se suele ajustar como en [57] para fuentes en el censo SHADES, a partir de la incertidumbre esperada en las posiciones de los objetos: $\Delta \alpha = \Delta \delta = 0.6 FWHM(S/N)^{-1}$ donde $\Delta \alpha$ y $\Delta \beta$ son los errores en ascención recta (RA) y declinación (Dec) respectivamente.

El segundo método de selección de contrapartes es por medio del ajuste de los parámetros de la distribución espectral de energía perteneciente a un cuerpo gris. De acuerdo a la expresión (1.1) los parámetros de ajuste son la temperatura del polvo T_d y el índice de emisividad β los cuales se obtienen minimizando el valor de χ^2_{red} del ajuste. Usando el mejor ajuste de la temperatura observada y asumiendo una temperatura típica en el sistema en reposo entonces uno puede usar estos colores FIR-mm para estimar corrimientos la rojo fotométricos. Si la contraparte óptica/IR tiene un corrimiento al rojo espectroscópico confiable, entonces la consistencia con el corrimiento al rojo fotométrico FIR-mm es una indicación de que hemos identificado la contraparte correcta.

3.2. Apilación de datos o stacking

La apilación de datos es una herramienta multifrecuencia que sirve para estimar la contribución en flujo que hace un tipo de población al fondo de radiación en un mapa dado. Desde que [17] la usó en 1985 para hallar la densidad de flujo promedio en rayos X de estrellas pertenecientes a las Pléyades que individualmente son muy débiles para detectar su contribución,

Capítulo 3

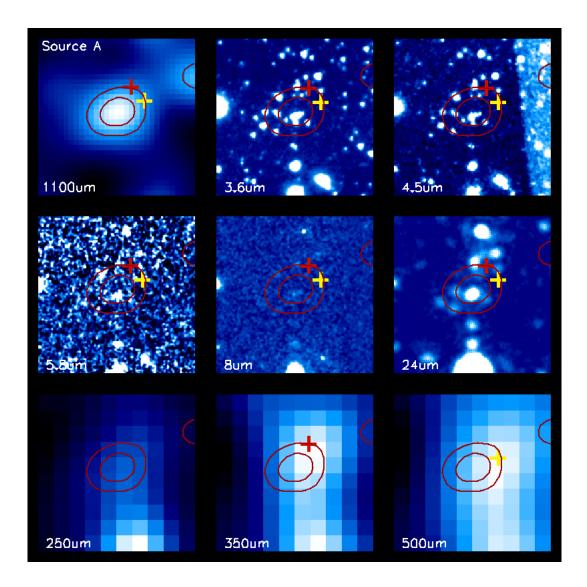


Figura 3.1: Colección de estampas de una misma región del cielo en 9 bandas diferentes: una de AzTEC, 5 de Spitzer y 3 de BLAST (1100, 3.6, 4.5, 5.8, 8, 24, 250, 350 y 500 $\mu \rm m$, respectivamente). Cada caja es de 100x100 arcsec. Los contornos rojos pertenecen a la fuente A (primera caja) y representan distintos niveles de señal a ruido (2.5 σ a 5.5 σ). Las cruces de colores representan las posiciones de las fuentes BLAST (rojo: 350 $\mu \rm m$ y amarillo: 500 $\mu \rm m$). La escala de colores se manipuló para resaltar los objetos en cada banda. No es la misma para todas ellas.

la convirtieron en una técnica muy popular.

Inumerables trabajos se han hecho a partir de esta técnica debido a que no depende de la longitud de onda y el criterio de selección de fuentes respecto a las cuales se hará la apilación de datos se adapta a lo que se desee analizar. Por ejemplo, podemos centrar el estudio en la contribución de un grupo selecto de fuentes en el IR [35, 75] o bien fuentes submm-mm [90, 71] al fondo cósmico de radiación IR. También se puede conocer la contribución que tienen las galaxias en el IR en el fondo de radiación submm [92]. En [107] se aplicó la técnica en cúmulos seleccionados del catálogo SDSS (Sloan Digital Sky Survey) con el objetivo de medir la luz intracúmulo. Incluso se ha aplicado la apilación de datos en simulaciones cosmológicas para investigar el efecto Sunyaev-Zel'dovich en el CMB [85].

En general, la técnica de apilación de datos o stacking nos brinda la oportunidad de analizar simultáneamente datos de distintas bandas para obtener información adicional de una población que se encuentra oculta si hacemos un análisis individual de fuentes detectadas. La única forma para entender la población débil es por medio de la apilación de datos. Sin embargo siempre hace falta un estudio detallado de las fuentes y sus posibles contrapartes en otras bandas para así obtener propiedades más específicas de las galaxias en formación.

El método aquí aplicado consiste en ir apilando o sumando regiones de un mapa A observado en cierta banda, centradas en las coordenadas de objetos detectados en la banda B con el objetivo de obtener la densidad de flujo promedio que aporta en el mapa A. Entonces, sea n el número de fuentes de un catálogo y el par de índices j,k las coordenadas de cada fuente. Si tenemos un mapa A con valores de flujo S_i y otro mapa de ruido R con valores σ_i para cada píxel entonces la expresión para la apilación de datos queda:

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i}^{n} S_i^{j,k} \tag{3.2}$$

donde \bar{S} es la densidad de flujo promedio de la detección resultante, $S_i^{j,k}$ es la densidad de flujo que le corresponde a cada una de las fuentes en la banda B con coordenadas j,k en el mapa A; y n es el número de fuentes con coordenadas conocidas en la banda B. El ruido promedio $\bar{\sigma}$ de la detección obtenido es:

Capítulo 3 41

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\sigma_i^{j,k})^2} \tag{3.3}$$

donde $\sigma_i^{j,k}$ es el ruido que le corresponde a cada una de las fuentes en la banda B con coordenadas j,k en el mapa R. La ecuación anterior resulta de una simple propagación de errores para un promedio. Si se trabaja con mapas que tienen un nivel de ruido uniforme, entonces la expresión (3.3) queda:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_i^{j,k}}{\sqrt{n}} \tag{3.4}$$

Nótese que de esta forma la razón de señal a ruido (s/n) se incrementa por un factor de \sqrt{n} , o bien, entre más fuentes en la banda B se tengan para hacer la apilación de datos, más se reducirá el ruido por detección. Ésta es la principal razón para haber elegido la sencilla expresión (3.2) como base de la técnica de la apilación de datos. Sin embargo existen otras formas de llevar a cabo la apilación de datos, por ejemplo, [35], aplicó fotometría de apertura para extraer exclusivamente la densidad de flujo de cada una de las regiones del mapa en el IR-lejano correspondientes a galaxias en el IR-intermedio.

El método de [35] fue aplicado por [75] a los mismos datos BLAST que utilizó [71] donde se ocupó un método muy parecido al explicado en este trabajo (expresión 3.2). Al comparar los trabajos de [71] y [75] se encontró que los resultados son consistentes, lo cual nos lleva a pensar que la forma para calcular la apilación de datos no es tan importante como el principio en sí de la técnica: la combinación de datos para reducir el ruido y recuperar las señales débiles.

En la imagen superior de 3.2 se muestra un ejemplo de lo que se puede lograr con esta técnica. En este caso tenemos la apilación de datos de 37 posiciones BLAST (250 μ m) sobre el mapa a 1.1 mm. Se puede observar una clara detección al centro de la imagen. Si se obtiene una señal considerable (s/n>3.5) a partir de la apilación de datos entonces se le puede ajustar una gaussiana para obtener los parámetros que caracterizan a la detección, como su desviación estándar, el valor del pico y del centro de la distribución. Por medio de estos parámetros podemos checar la astrometría de los mapas. En la imagen inferior de 3.2 se muestra el ajuste para la detección antes mostrada con sus respectivos datos obtenidos de la gaussiana. Además se

muestra en la figura 3.3 la imagen de residuales entre el ajuste y la detección real, con sus respectivos ajustes de los cortes sobre las 2 dimensiones de la detección.

Para poder aplicar exitosamente la técnica de apilación de datos se requiere buena astrometría tanto para las fuentes en la banda B como para el mapa A. Se puede verificar fácilmente la astrometría de los mapas si tenemos un catálogo confiable de fuentes que ya cuenten con buena astrometría para poder hacer la apilación de datos y calcular el desplazamiento o bien la distancia y dirección a la cual tenemos que mover el mapa con el fin de obtener posiciones más precisas de las fuentes. Comúnmente se ocupan las contrapartes en radio para mejorar la incertidumbre de las posiciones de las fuentes submm (por ejemplo, [58, 57, 90]).

También el método requiere que el catálogo de fuentes no presente agrupamientos a la escala del haz del telescopio ya que esto podría ocasionar la sobreestimación de la densidad de flujo promedio y por lo tanto obtener una contribución sesgada de una población dada a la radiación total del cielo. Sin embargo el agrupamiento asociado al mapa sobre el cual se realizará la apilación de datos no representa una fuente adicional de ruido para la densidad de flujo promedio obtenida por la expresión (3.2) ya que la distribución del ruido tiene en promedio un valor de cero entonces el valor medio del flujo no se modifica significativamente.

Algunos autores recomiendan obtener la mediana en lugar del valor medio de la densidad de flujo para así evitar la dependencia de la técnica sobre el número de fuentes para la apilación de datos [18]. Esto es, para tener una validez estadística se requiere un gran número de fuentes de catálogo para que los resultados a partir de la técnica sean confiables. En [103] se realizó una comparación detallada para ambos métodos mostrando que el análisis por apilación de datos hallando la mediana de la densidad de flujo es superior al obtenido por el promedio debido a que el primero es un método más robusto para muestras pequeñas.

3.3. Estimación de corrimientos al rojo

El polvo frío radía (sistema de referencia en reposo) en la región IR del espectro electromagnético pero la expansión del Universo provoca que se

Capítulo 3 43

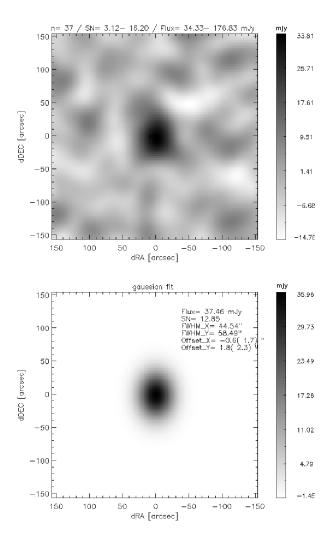


Figura 3.2: Imagen superior. Contribución de una cierta población detectada en la banda de 250 μ m de BLAST al fondo de radiación de la imagen de AzTEC. En el título se encuentra la información referente a las fuentes del catálogo (n es número de fuentes, SN es la razón señal a ruido de las fuentes y Flux es el rango de flujos de las fuentes a 250 μ m). Imagen inferior. Ajuste gaussiano en las dos dimensiones (X,Y) a partir de la apilación de datos. El texto del lado superior son los valores obtenidos del ajuste. (Flux corresponde al valor máximo del ajuste, SN es la razón señal a ruido que le corresponde al valor flux, FWHM_X/Y son los valores de la anchura del ajuste a la mitad del valor flux en las dos dimensiones y Offset_X/Y son los valores del centroide del ajuste). Información para ambas imágenes: La caja es de 300×300 arcsec. La barra de colores al lado derecho corresponde a la escala de flujos en mJy.

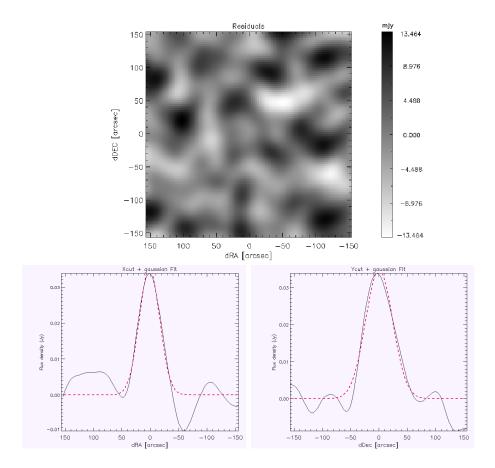


Figura 3.3: Imagen superior, caja de 300×300 arcsec que representa los residuales entre el ajuste y la detección resultante. La barra al lado derecho corresponde a la escala de colores/flujos en mJy. Imagen inferior izquierda, gráfica que representa la distribución de flujos que corresponde al corte en la dirección X de la detección incluyendo el valor máximo de flujo (línea sólida), sobrepuesto con líneas punteadas está el ajuste gaussiano a dicha distribución. Imagen inferior derecha, gráfica que representa la distribución de flujos que corresponde al corte en la dirección Y de la detección incluyendo el valor máximo de flujo (línea sólida), sobrepuesto con líneas punteadas está el ajuste gaussiano a dicha distribución.

recorra a otras longitudes de onda. A grandes corrimientos al rojo (z > 1) la emisión en el IR-lejano proveniente de las regiones de formación estelar de galaxias lejanas se corre a la banda submm-mm. Esta emisión depende de las propiedades del polvo y del tipo de fuente que lo está calentando así que

Capítulo 3 45

el ajuste de la SED nos brinda información acerca de las condiciones físicas del medio. El polvo frío se caracteriza por tener temperaturas que van desde unos 15 K hasta unos 100 K y un índice de emisividad típicamente entre 1 y 2.

Una manera simple de obtener los corrimientos al rojo es mediante la relación que existe entre éstos y los colores. En la figura 3.4 se muestra el diagrama para la razón de flujos $S_{250\mu m}/S_{350\mu m}$, $S_{250\mu m}/S_{500\mu m}$ y $S_{250\mu m}/S_{1100\mu m}$ graficados en función del corrimiento al rojo. Con la combinación de colores de BLAST y AzTEC tenemos sensibilidad a una población con corrimientos al rojo >1.0. De esta forma podemos acotar el intervalo de corrimientos al rojo para una población dada. [55] y [19] propusieron la razón de densidad de flujos $S_{850\mu m}/S_{1.4GHz}$ como un indicador de los corrimientos al rojo de galaxias submm. [97] y [58] fueron los primeros en emplear la técnica para muestras significativas de galaxias submm, encontrando una mediana para la distribución de los corrimientos al rojo $z \geq 2$.

Existen SEDs que caracterizan a objetos cercanos bien conocidos como galaxias con brotes estelares, ULIRGs y AGNs. Si suponemos que alguna de estas poblaciones es representativa de aquellas que se encuentran a grandes corrimientos al rojo entonces podemos usar, por ejemplo, Arp220 (T=41.7 K y β =1.3) como modelo para ajustar los datos submm-mm. Si conocemos la SED que caracteriza a alguna fuente entonces podemos obtener otras propiedades relativas a la misma fuente.

Nótese que los parámetros obtenidos de la SED son los correspondientes al sistema de referencia del observador. Si quisiéramos saber los parámetros en el sistema en reposo de la fuente es necesario considerar los efectos de expansión del Universo. Si tenemos una SED que se ajusta bien a los parámetros de Arp220, es decir, $T_{em}=41.7K$ donde T_{em} es la temperatura en reposo, y como la temperatura del polvo en el sistema de referencia en reposo es mayor que la temperatura que tendría en el sistema del observador $(T_{em}=T_{obs}(1+z))$, entonces $z=\frac{41.7K}{T_{obs}}-1$.

Debido a que se pueden ajustar varios modelos de SED se produce una degeneración en los parámetros. Una buena técnica para considerar esta degeneración es a través de la estimación de corrimientos al rojo fotométricos por Monte Carlo [54, 3], la cual consiste en hacer simulaciones para generar mapas y catálogos de fuentes a las cuales se les asigna una SED conocida de forma aleatoria de entre una muestra de ULIRGs, AGNs y galaxias con bro-

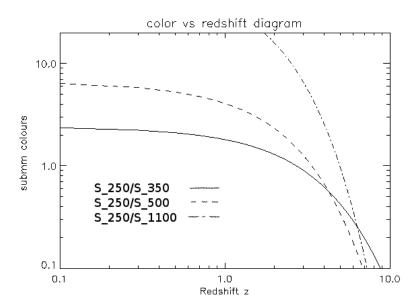


Figura 3.4: Razón de flujos $S_{250\mu m}/S_{350\mu m}$, $S_{250\mu m}/S_{500\mu m}$ y $S_{250\mu m}/S_{1100\mu m}$ graficados en función del corrimiento al rojo adoptando como modelo a Arp220. Con la combinación de colores de BLAST y AzTEC tenemos sensibilidad a una población con corrimientos al rojo >1.0.

Capítulo 3 47

tes estelares con valores de corrimientos al rojo conocidos. Los corrimientos al rojo fotométricos se determinan a partir del cálculo de la probabilidad de que los colores (incluyendo los errores) de una galaxia submm observada sean consistentes con los colores de todas las galaxias simuladas. Se obtiene una distribución de probabilidades de corrimientos al rojo de cada galaxia después de considerar las probabilidades individuales de todo el catálogo. El corrimiento al rojo más probable de la galaxia submm en cuestión será el máximo de la distribución de probabilidad y se ha encontrado que para combinaciones de 3 o más bandas en el régimen radio-FIR la precisión es de $\Delta z \sim \pm 0.3$ [4].

Por otro lado, la distribución de corrimientos al rojo espectroscópicos sólo existen para galaxias submm con contrapartes en radio. Se ha demostrado que las galaxias mm polvosas también contienen grandes reservas de gas molecular [45] que alimentan la FE. Como resultado, uno de los instrumentos del GTM (el buscador de corrimientos al rojo, [24]) se encargará de explotar este fenómeno buscando las transiciones rotacionales del monóxido de carbono (CO) en las galaxias identificadas en los censos para hallar sus corrimientos al rojo espectroscópicos en la banda de 3 mm.

3.4. Estimación de flujos y completez

Para poder derivar propiedades generales de la población de galaxias mm, los catálogos de fuentes deben ser corregidos de los efectos de la densidades de flujo sobrestimadas (del término en inglés flux deboosting; [29]), y debemos caracterizar la incompletez de los mapas y de la tasa de falsas detecciones de fuentes. La sensibilidad a estos efectos depende del nivel de ruido de los mapas y del diseño de los censos.

El problema de las densidades de flujo sobrestimadas se presenta cuando detectamos fuentes con flujos mayores a los reales. Esto es debido a que la curva de conteo de fuentes submm predice un alto número de fuentes de baja densidad de flujo lo que significa que existe una alta probabilidad de que una fuente brillante se encuentre cerca de varias débiles, provocando una contribución por estas fuentes y la sobrestimación de las densidades de flujo. Para corregir este efecto en los mapas submm se utiliza el método Bayesiano desarrollado en [29]. Para una fuente detectada con una densidad de flujo medida $S_m \pm \sigma_m$, la distribución de probabilidad para su densidad de flujo

intrínseca S_i está dada por:

$$p(S_i|S_m, \sigma_m) = \frac{p(S_i)p(S_m, \sigma_m \mid S_i)}{p(S_m, \sigma_m)}$$
(3.5)

donde $p(S_i)$ es la distribución de densidades de flujo simulada a partir del conteo de fuentes teórico, $p(S_m, \sigma_m \mid S_i)$ es la verosimilitud de observar los datos y $p(S_m, \sigma_m)$ es una constante de normalización. La fracción de la distribución posterior de flujos $p(S_i|S_m, \sigma_m)$ con $S_i < 0$ es tomada como la probabilidad de que una fuente dada sea una falsa detección.

Otro problema que se debe considerar es la detección de fuentes falsas las cuales son causadas por altos niveles de ruido. Con el algoritmo de búsqueda de fuentes se encuentran los picos en los mapas de ruido que tengan cierta razón señal a ruido (elegida a criterio) encontrando así el número promedio de fuentes falsas. La completez de los mapas se estima a partir del número de veces que el algoritmo de búsqueda de fuentes selecciona correctamente una fuente simulada que ha sido integrada al mapa real aleatoriamente. Entonces se puede decir, después de repetir el proceso varias veces para una misma fuente, que un censo tiene cierto porcentaje de completez a una densidad de flujo dada. Tanto el problema de densidades de flujo sobrestimadas como el índice de falsas detecciones afectan la completez del catálogo de fuentes.

3.5. Función de luminosidad

La distribución de corrimientos al rojo es un requisito esencial para determinar con precisión la función de luminosidad con el objetivo de poder estudiar la evolución de las poblaciones. La función de luminosidad proporciona el número de fuentes con una luminosidad dada por unidad de volumen. En el caso de galaxias, su evolución depende de sus propiedades internas [81] y está fuertemente correlacionada con el color de éstas [68].

Existen diferentes expresiones para ajustar la función de luminosidad de galaxias pero la más aceptada debido a su concordancia con las distribuciones de luminosidades de galaxias brillantes cercanas y de galaxias en cúmulos es la propuesta por [86]. [84] propuso una función de luminosidad a $60 \mu m$ y en el IR-lejano de galaxias detectadas por el satélite Astronómico Infrarrojo IRAS (InfraRed Astronomical Satellite) la cual resultó ser una

expresión robusta para luminosidades en el rango $10^5 - 10^9 h^{-2} L_{\odot}$ donde

•

Capítulo 3 49

 $h=H_0/100 km/s/Mpc$. Las dos expresiones mencionadas son las más populares para comparar o ajustar las observaciones con un modelo (ejemplo en figura 1.4 del conteo de fuentes).

Sabiendo que la población submm presenta evolución [91] se puede suponer que la luminosidad de una galaxia L_g está dada por $L_g(z) = E(z)L_g(0)$, donde $L_g(0)$ es la luminosidad empírica de la galaxia en su apropiado marco de referencia en reposo, y E(z) es una función de evolución. [84] propuso un modelo para la función de evolución: $E(z) = (1+z)^3$. Esta sencilla expresión funciona bien hasta z = 2, a partir del cual la evolución se congela [70].

Una forma de estimar la función de luminosidad $\phi(M)$ es mediante el método V_{max} [88] el cual considera el número de galaxias con magnitud absoluta M en un catálogo limitado por magnitud, es decir, $N(M) = \phi(M) \left[V_{max}(M) - V_{min}(M) \right]$, donde $V_{max}(M)$ es el volumen comovil máximo hasta donde un objeto de magnitud absoluta M puede ser visto, y $V_{min}(M)$ es el volumen comovil mínimo debajo del cual un objeto de magnitud absoluta M habría sido visto demasiado brillante. Por lo tanto, si sumamos sobre todas las galaxias del catálogo limitado por magnitud y pesamos cada objeto por el inverso de $V_{max}(M) - V_{min}(M)$ entonces se estará estimando la función de luminosidad.

El cálculo de la función de luminosidad con corrimientos al rojo precisos es relativamente sencillo. Cuando las distancias no son bien conocidas (por ejemplo, cuando se tienen corrimientos al rojo fotométricos pero no espectroscópicos) la estimación de la función de luminosidad se complica. Para manipular esta complicación, [93] obtuvo un estimador para la función de luminosidad que es una generalización del algoritmo V_{max} , cuya expresión es:

$$N_e(M_e) = \int dM N(M) p(M_e \mid M)$$
(3.6)

donde $N_e(M_e)$ es el número total de objetos con magnitud absoluta estimada M_e y $p(M_e \mid M)$ es la distribución de probabilidad para la magnitud absoluta estimada de un objeto dada su magnitud absoluta medida M. Sheth et al. usó el algoritmo iterativo de deconvolución de [69] para obtener la función de luminosidad. De esta manera, teniendo corrimientos al rojo fotométricos FIR-mm y luminosidades en el FIR, podemos estimar la función de luminosidad de la población submm.

En la figura 3.5 se muestra la capacidad que tienen algunos de los principales telescopios para detectar en la banda IR (8-1000 μ m) las galaxias lejanas. El texto se refiere a las bandas en las cuales se hicieron los censos y los valores entre paréntesis son los límites de confusión de los telescopios. La escala a la derecha de la imagen expresa la tasa de FE estimada a partir de la fórmula 1.2 la cual relaciona la tasa de FE con la L_{FIR} . Debido a los efectos de la corrección K, la observación con el GTM es sensible a galaxias con $L_{IR} \sim 10^{11} L_{\odot}$, lo que permitirá construir funciones de luminosidad para galaxias con dicha luminosidad.

La figura 3.5 es muy importante ya que presenta las funciones de selección de fuentes a diferentes longitudes de onda. Por ejemplo, MIPS a 24 μ m (línea sólida) detectará fuentes con $L_{IR} \sim 10^{10} L_{\odot}$ aproximadamente a z=1 mientras que el GTM detectará galaxias con $L_{IR} \sim 10^{11} L_{\odot}$ para el mismo corrimiento al rojo lo que significa que Spitzer con MIPS es más sensible a galaxias débiles que el GTM para z=1. Para 1.5<z<2, ambos telescopios tienen casi el mismo desempeño pero para z>2 el GTM es sensible a galaxias más débiles de las que puede llegar a ver Spitzer ($L_{IR} > 10^{11} L_{\odot}$).

3.6. Estimación de la historia de formación estelar

La luminosidad en el FIR da una medida de la tasa de formación de estrellas masivas. Una manera de obtener la luminosidad en el FIR es mediante la correlación de luminosidades radio-FIR que caracteriza a la población de galaxias submm para z \sim 0.5-4 [62]. La ventaja de usar ésta es que proporciona luminosidas promedio precisas en el FIR para el grosor de la población. Este método fue usado por [4] donde la luminosidad monocromática a 1.4 GHz es convertida a luminosidad en el FIR mediante la relación $\log(L_{FIR}/L_{1.4GHz}/4.52) = 2.14$ THz \pm 0.07 [62].

La expresión 1.2 muestra la relación que existe entre la tasa de formación estelar y la luminosidad en el FIR donde el factor de proporcionalidad depende de la función inicial de masa, de la fracción de radiación óptica/UV absorbida por polvo y de la escala temporal del brote. Como se muestra en [60], la emisión en el IR-lejano está muy correlacionada con la actividad de FE bajo la suposición de que esta actividad está ópticamente oscurecida por la presencia de polvo y que la fracción de luminosidad IR producida por AGNs es despreciable.

Capítulo 3 51

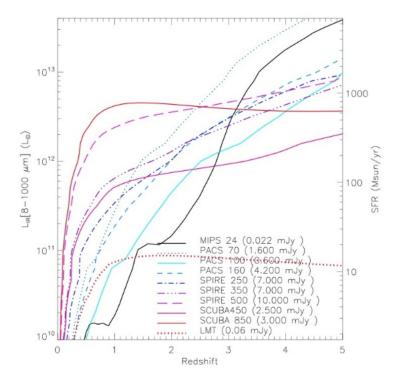


Figura 3.5: Dependencia de la luminosidad IR con el corrimiento al rojo. La figura muestra la capacidad que tienen los principales telescopios para detectar en la banda IR (8-1000 μ m) las galaxias lejanas. El texto se refiere a las bandas en las cuales se hicieron los censos y los valores entre paréntesis son los límites de confusión de los telescopios. La escala a la derecha de la imagen expresa la tasa de FE. (Imagen tomada de Schloerb et al. en preparación).

En la figura 3.6 se muestra la evolución de la densidad de la tasa de FE global trazada por fuentes SHADES, obtenida por [4]. Una buena descripción para la densidad de la tasa de FE trazada por esta población está dada por $\dot{\rho}_{FE} \approx 0.35 \, \exp[-0.5(z-2.8)^2/(0.8^2)]$ [4].

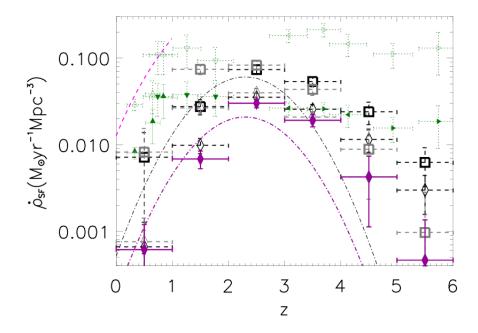


Figura 3.6: Evolución de la densidad de la tasa de FE global (DTFE) para diferentes muestras de galaxias. Los diamantes sólidos representan la DTFE de la población SHADES detectada en radio. La población total SHADES, detectada o no en radio, son los diamantes sin relleno. Los cuadros grises y negros representan la DTFE trazada por los brotes de FE ultraluminosos a 850 $\mu \rm m$. La línea rosa punteada muestra la DTFE inferida de (U)LIRGs seleccionadas a 24 $\mu \rm m$. La línea púrpura gruesa de puntos y guiones muestra la DTFE de galaxias SCUBA extraídas de [23]. La línea negra delgada de puntos y guiones es una estimación de la contribución de galaxias seleccionadas a 850 $\mu \rm m$ por debajo de ~ 1 mJy. La DTFE de brotes de FE seleccionados en el óptico/UV corregidos o no por extinción se muestran con triángulos vacíos y sólidos pequeños, respectivamente.

Por lo tanto podemos usar observaciones FIR-mm para medir y restringir los corrimientos al rojo y luminosidades bolométricas en el FIR y así obtener la tasa de FE para cada objeto. Dadas las grandes muestras de galaxias

Capítulo 3 53

(>1000) que hemos detectado con BLAST y AzTEC, podemos estimar una medida estadística robusta de la historia de FE oscurecida. Esto será uno de los objetivos principales de esta tesis.

Como se ha visto a lo largo de este capítulo, la naturaleza y las propiedades físicas de las galaxias submm son objeto de muchos trabajos de investigación que han planteado las bases para el desarrollo de nuevas y mejores técnicas de análisis y observación de esta población. Futuros experimentos (GTM, ALMA, Herschel, etc) tratarán de resolver cada vez preguntas aún más ambiciosas para demostrar que nuestro conocimiento no tiene límites y nos sorprenderán los descubrimientos que ampliarán nuestra visión del Universo.

Capítulo 4

Trabajo a futuro

El contenido de este capítulo está dirigido hacia la descripción de actividades a lo largo del plazo correspondiente al doctorado. Esto incluye el trabajo que complementará los resultados a partir de las técnicas estadísticas propuestas en el capítulo anterior.

4.1. Explotación simultánea de datos BLAST y AzTEC/ASTE

Las bandas de BLAST y AzTEC (de 250 μ m a 1 mm) se han propuesto como una combinación efectiva para poder derivar el corrimiento al rojo fotométrico de las galaxias que dominan el fondo IR [54], y así deducir propiedades globales de la población tales como la historia de formación estelar o la evolución de la función de luminosidad.

Se combinarán los catálogos de fuentes BLAST y AzTEC, a los que tengo acceso exclusivo a través de colaboración, en los campos de GOODS-S y SEP para derivar catálogos multifrecuencia de fuentes detectadas por ambos telescopios. A pesar de que las frecuencias a utilizar están comprendidas en un intervalo pequeño de longitudes de onda, se ha encontrado contaminación en las longitudes de onda más cortas por poblaciones de galaxias más cercanas en algunas galaxias milimétricas (e.g. [78]). Por este motivo se realizará un análisis formal de asociaciones de fuentes BLAST-AzTEC con fuentes IR Spitzer (estadística P, capítulo 3.1) para establecer cuáles son más plausibles de estar contaminadas por emisión de poblaciones cercanas. Los catálogos Spitzer cuentan ya con corrimientos al rojo fotométricos [39],

y estos se utilizarán para estimar la posible contaminación.

Las fuentes no contaminadas, pasarán a ser ajustadas a SEDs típicas para poder derivar sus parámetros de emisividad, temperatura, corrimiento al rojo y luminosidad, a partir de métodos simples de chi-cuadrado (capítulo 3.3) o de Monte Carlo [53].

Se utilizarán las fuentes no detectadas a 250 μ m y/o 350 μ m para realizar un análisis de apilamiento (capítulo 3.2) utilizando las fuentes AzTEC. Estas fuentes, que se caen de los catálogos en las bandas más cortas (dropouts), son candidatas a estar a un corrimiento al rojo mayor (Fig. 1.3). La señal detectada estadísticamente pasará a formar parte de SEDs que se ajustarán formalmente de la misma manera que si fueran fuentes detectadas individualmente, y pondrán de relieve la contribución de la población a los corrimientos al rojo más extremos a los que BLAST pueda llegar. La ausencia de detección estadística, además, es también una información que se puede aprovechar de forma robusta [54].

Con información fotométrica a la mano, y con la información espectroscópica sobre las asociaciones IRAC más robustas que cuenten con seguimiento espectroscópico, se elaborarán diagramas de la historia de formación estelar comprendida por galaxias milimétricas, teniendo en cuenta las distribuciones de errores en corrimiento al rojo y luminosidad a partir de Métodos de Monte Carlo (e.g. [4]) o de inversiones de distribuciones (e.g. [93]). Las galaxias detectadas en estos censos, supuestamente, conformarán la cola de mayor luminosidad de la población, y se buscarán trazas de evolución en esta cola.

A pesar de que la historia de formación estelar ha sido derivada anteriormente por otros censos, como SHADES (e.g. [4, 40, 5]), ésta siempre ha dependido de la información radio, que sufre de correción K positiva, o de la guía de contrapartes a 24 μ m, que la interferometría sub-mm ha comprobado es poco fiable [105, 106]. La combinación de catálogos BLAST/AzTEC nos brinda la primera oportunidad de derivar estas propiedades globales de las galaxias oscurecidas con altas tasas de formación estelar sin estos posibles sesgos.

Capítulo 4 57

4.2. Seguimiento de los datos de AzTEC/BLAST

Armados con un catálago de fuentes con corrimientos al rojo fotométricos con precisiones del orden de $\Delta z \approx 0.3-0.4$ [54, 4], una vez que el GTM entre en su primera fase de operación científica en la banda de 3 mm, será factible realizar seguimiento del catálogo multifrecuencia AzTEC/BLAST para encontrar líneas de CO que determinen con mayor precisión los corrimientos al rojo, a pesar de que en muchas de estas galaxias sólo se encuentre una línea de emisión en toda la banda cubierta por el receptor de corrimientos al rojo [24]. Una vez que se tengan corrimientos al rojo espetroscópicos, las determinaciones de historia de formación estelar y funciones de luminosidad se podrán realizar con mayor precisión. Además, a través de las líneas de CO se podrá también medir la masa dinámica de las galaxias en cuestión, y comprobar si el escenario de downsizing propuesto por la determinación de masa estelares de galaxias sub-mm es correcto [40]. Distribuciones de corrimientos al rojo, historias de formación estelar y evoluciones de la función de luminosidad se podrán comparar entonces con las predichas por diferentes modelos teóricos (e.g. [8, 102]).

4.3. Explotación simultánea de datos Herschel y AzTEC/GTM

La explotación de datos BLAST/AzTEC será continuada con los mapas más profundos trazados por Herschel, a través de las zonas más produndas del censo de 600 grados cuadrados, ATLAS, al cual tengo acceso por colaboración, y al censo profundo de tiempo garantizado HERMES, cuando éste se haga público. Los datos de ATLAS están disponibles a partir de la primera mitad del 2010, y se espera que tan pronto se alinie la superficie del GTM con precisiones del orden de los 70-100 μ m, se podrán realizar censos a 1 mm con AzTEC sobre estos mismos campos. Los censos de GTM, al ser más profundos que los de ASTE y sobrepasar el límite de confusión de ASTE y JCMT, nos dará acceso a galaxias con luminosidades del orden de 10¹¹ luminosidades solares, y con ellas se espera poder caracterizar la evolución de la función de luminosidad de las galaxias mm y la contribución de galaxias "normales" oscurecidas a la historia de formación estelar del universo. Además el seguimiento de estos nuevos catálogos extensos de fuentes con el receptor de corrimientos al rojo nos dará la oportunidad de trazar la evolución de la función de masas en el régimen mayor o igual a $10^{11} M_{\odot}$.

Índice de figuras

1.1.	Fondo extragaláctico de radiación total observado desde el	
	régimen óptico hasta el IR-lejano	7
1.2.	Densidad espectral de energía del ULIRG Arp 220	10
1.3.	Corrección K	11
1.4.	Conte o de fuentes a 850 $\mu {\rm m}$	13
2.1.	Diagrama Color-color versus la distribución de corrimientos	
	al rojo	20
2.2.	Áreas cubiertas por algunos de los principales telescopios para	
	el campo de CDF-South	24
2.3.	Áreas que cubren los distintos telescopios en el campo de SEP.	25
2.4.	Telescopio Submilimétrico de Gran Apertura a Bordo de un	
	Globo: BLAST	27
2.5.	Regiones del cielo extragaláctico observadas desde el hemis-	
	ferio sur por BLAST en el 2006	29
2.6.	Telescopio ASTE y cámara AzTEC	30
2.7.	Gran Telescopio Milimétrico	31
2.8.	Áreas de los censos propuestos y el fondo correspondiente	
	que podría resolver el GTM con AzTEC a 1.1 mm vs. las	
	sensibilidades requeridas a 850 μm	33
3.1.	Colección de estampas de una misma región del cielo en 9	
	bandas diferentes: una de AzTEC, 5 de Spitzer y 3 de BLAST	39
3.2.	Técnica de apilación de datos y ajuste gaussiano en las dos	
	dimensiones	43
3.3.	Residuales entre el ajuste gaussiano y la detección resultante	
	de la apilación de datos	44
3.4.	Diagrama color vs corrimiento al rojo	46
3.5.	Capacidades de algunos telescopios	51

3.6.	Evolución de l	la densidad de la tasa de FE global para dife-	
	rentes muestra	as de galaxias	52

Índice de cuadros

2.1.	Primera	generación	de	instrumentos	en	el	GTM					_	_	_		32
4.1.	1 IIIICI a	generación	uc	msu umenos	CII	CI	OIM	•	•	•	•	•	•	•	•	04

Bibliografía

- [1] J. E. Aguirre and Bolocam-COSMOS. Mapping the COSMOS at 1mm using BOLOCAM. In *Bulletin of the American Astronomical Society*, volume 36 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, pages 1478—+, December 2004.
- [2] D. M. Alexander, F. E. Bauer, S. C. Chapman, I. Smail, A. W. Blain, W.Ñ. Brandt, and R. J. Ivison. The X-Ray Spectral Properties of SCUBA Galaxies. ApJ, 632:736–750, October 2005.
- [3] I. Aretxaga, D. H. Hughes, E. L. Chapin, E. Gaztañaga, J. S. Dunlop, and R. J. Ivison. Breaking the 'redshift deadlock'- II. The redshift distribution for the submillimetre population of galaxies. MNRAS, 342:759–801, July 2003.
- [4] I. Aretxaga, D. H. Hughes, K. Coppin, A. M. J. Mortier, J. Wagg, J. S. Dunlop, E. L. Chapin, S. A. Eales, E. Gaztañaga, M. Halpern, R. J. Ivison, E. van Kampen, D. Scott, S. Serjeant, I. Smail, T. Babbedge, A. J. Benson, S. Chapman, D. L. Clements, L. Dunne, S. Dye, D. Farrah, M. J. Jarvis, R. G. Mann, A. Pope, R. Priddey, S. Rawlings, M. Seigar, L. Silva, C. Simpson, and M. Vaccari. The SCUBA Half Degree Extragalactic Survey IV. Radio-mm-FIR photometric redshifts. MNRAS, 379:1571–1588, August 2007.
- [5] J. E. Austermann, I. Aretxaga, D. H. Hughes, Y. Kang, S. Kim, J. D. Lowenthal, T. A. Perera, D. B. Sanders, K. S. Scott, N. Scoville, G. W. Wilson, and M. S. Yun. AzTEC Millimetre Survey of the COSMOS field II. Source count overdensity and correlations with large-scale structure. MNRAS, 393:1573–1583, March 2009.
- [6] J. W. M. Baars, B. G. Hooghoudt, P. G. Mezger, and M. J. de Jonge. The IRAM 30-m millimeter radio telescope on Pico Veleta, Spain. A&A, 175:319–326, March 1987.

[7] A. J. Barger, L. L. Cowie, D. B. Sanders, E. Fulton, Y. Taniguchi, Y. Sato, K. Kawara, and H. Okuda. Submillimetre-wavelength detection of dusty star-forming galaxies at high redshift. Nature, 394:248– 251, July 1998.

- [8] C. M. Baugh, S. Cole, and C. S. Frenk. Evolution of the Hubble sequence in hierarchical models for galaxy formation. MNRAS, 283:1361–1378, December 1996.
- [9] F. Bertoldi, C. Carilli, M. Aravena, E. Schinnerer, H. Voss, V. Smolcic, K. Jahnke, N. Scoville, A. Blain, K. M. Menten, D. Lutz, M. Brusa, Y. Taniguchi, P. Capak, B. Mobasher, S. Lilly, D. Thompson, H. Aussel, E. Kreysa, G. Hasinger, J. Aguirre, J. Schlaerth, and A. Koekemoer. COSBO: The MAMBO 1.2 Millimeter Imaging Survey of the COSMOS Field. ApJS, 172:132–149, September 2007.
- [10] A. W. Blain. Gravitational lensing by clusters of galaxies in the millimetre/submillimetre waveband. MNRAS, 290:553–565, September 1997.
- [11] A. W. Blain, S. C. Chapman, I. Smail, and R. Ivison. Clustering of Submillimeter-selected Galaxies. ApJ, 611:725–731, August 2004.
- [12] A. W. Blain and M. S. Longair. Observing strategies for blank-field surveys in the submillimetre waveband. MNRAS, 279:847–858, April 1996.
- [13] A. W. Blain, I. Smail, R. J. Ivison, and J.-P. Kneib. The history of star formation in dusty galaxies. MNRAS, 302:632–648, February 1999.
- [14] A. W. Blain, I. Smail, R. J. Ivison, J.-P. Kneib, and D. T. Frayer. Submillimeter galaxies. Phys. Rep., 369:111–176, October 2002.
- [15] G. R. Blumenthal, S. M. Faber, J. R. Primack, and M. J. Rees. Formation of galaxies and large-scale structure with cold dark matter. Nature, 311:517–525, October 1984.
- [16] T. J. Broadhurst, A.Ñ. Taylor, and J. A. Peacock. Mapping cluster mass distributions via gravitational lensing of background galaxies. ApJ, 438:49–61, January 1995.
- [17] J.-P. Caillault and D. J. Helfand. The Einstein soft X-ray survey of the Pleiades. ApJ, 289:279–299, February 1985.

[18] C. L. Carilli, N. Lee, P. Capak, E. Schinnerer, K.-S. Lee, H. McCraken, M. S. Yun, N. Scoville, V. Smolčić, M. Giavalisco, A. Datta, Y. Taniguchi, and C. M. Urry. Star Formation Rates in Lyman Break Galaxies: Radio Stacking of LBGs in the COSMOS Field and the Sub-μJy Radio Source Population. ApJ, 689:883–888, December 2008.

- [19] C. L. Carilli and M. S. Yun. The Radio-to-Submillimeter Spectral Index as a Redshift Indicator. ApJ, 513:L13–L16, March 1999.
- [20] E. Carrasco, I. Aretxaga, and W. M. Irvine. El Gran Telescopio Milimetrico. Dos países vecinos exploran juntos el cosmos. 2006.
- [21] E. L. Chapin, P. A. R. Ade, J. J. Bock, C. Brunt, M. J. Devlin, S. Dicker, M. Griffin, J. O. Gundersen, M. Halpern, P. C. Hargrave, D. H. Hughes, J. Klein, G. Marsden, P. G. Martin, P. Mauskopf, C. B. Netterfield, L. Olmi, E. Pascale, G. Patanchon, M. Rex, D. Scott, C. Semisch, M. D. P. Truch, C. Tucker, G. S. Tucker, M. P. Viero, and D. V. Wiebe. The Balloon-borne Large Aperture Submillimeter Telescope (BLAST) 2005: A 4 deg² Galactic Plane Survey in Vulpecula (l = 59 deg). ApJ, 681:428-452, July 2008.
- [22] S. C. Chapman, A. W. Blain, R. J. Ivison, and I. R. Smail. A median redshift of 2.4 for galaxies bright at submillimetre wavelengths. Nature, 422:695–698, April 2003.
- [23] S. C. Chapman, A. W. Blain, I. Smail, and R. J. Ivison. A Redshift Survey of the Submillimeter Galaxy Population. ApJ, 622:772–796, April 2005.
- [24] A. Chung, G. Narayanan, M. S. Yun, M. Heyer, and N. R. Erickson. The Redshift Search Receiver Observations of 12CO J=1->0 in 29 Ultraluminous Infrared Galaxies. *ArXiv e-prints*, June 2009.
- [25] J. J. Condon. Confusion and Flux-Density Error Distributions. ApJ, 188:279–286, March 1974.
- [26] J. J. Condon. Radio emission from normal galaxies. ARA&A, 30:575–611, 1992.
- [27] A. Cooray, A. Amblard, C. Beichman, D. Benford, R. Bernstein, J. J. Bock, M. Brodwin, V. Bromm, R. Cen, R. R. Chary, M. Devlin, T. Dolch, H. Dole, E. Dwek, D. Elbaz, M. 'Fall, G. Fazio, H. Ferguson, S. Furlanetto, J. Gardner, M. Giavalisco, R. Gilmore, N. Gnedin, A. Gonzalez, Z. Haiman, T. Kelsall, E. Komatsu, G. Lagache,

L. R. Levenson, A. Loeb, P. Badau, J. C. Mather, T. Matsumoto, K. Mattila, M. Moseley, L. Moustakas, S. P. Oh, L. Petro, J. Primack, W. Reach, T. Renbarger, P. Shapiro, D. Stern, I. Sullivan, A. Venkatesan, M. Werner, R. Windhorst, E. L. Wright, and M. Zemcov. A New Era in Extragalactic Background Light Measurements: The Cosmic History of Accretion, Nucleosynthesis and Reionization. *Astronomy*, 2010:54—+, 2009.

- [28] K. Coppin, E. L. Chapin, A. M. J. Mortier, S. E. Scott, C. Borys, J. S. Dunlop, M. Halpern, D. H. Hughes, A. Pope, D. Scott, S. Serjeant, J. Wagg, D. M. Alexander, O. Almaini, I. Aretxaga, T. Babbedge, P.Ñ. Best, A. Blain, S. Chapman, D. L. Clements, M. Crawford, L. Dunne, S. A. Eales, A. C. Edge, D. Farrah, E. Gaztanaga, W. K. Gear, G. L. Granato, T. R. Greve, M. Fox, R. J. Ivison, M. J. Jarvis, T. Jenness, C. Lacey, K. Lepage, R. G. Mann, G. Marsden, A. Martinez-Sansigre, S. Oliver, M. J. Page, J. A. Peacock, C. P. Pearson, W. J. Percival, R. S. Priddey, S. Rawlings, M. Rowan-Robinson, R. S. Savage, M. Seigar, K. Sekiguchi, L. Silva, C. Simpson, I. Smail, J. A. Stevens, T. Takagi, M. Vaccari, E. van Kampen, and C. J. Willott. SCUBA Half-Degree Extragalactic Survey. II (Coppin+, 2006). VizieR Online Data Catalog, 837:21621-+, August 2007.
- [29] K. Coppin, E. L. Chapin, A. M. J. Mortier, S. E. Scott, C. Borys, J. S. Dunlop, M. Halpern, D. H. Hughes, A. Pope, D. Scott, S. Serjeant, J. Wagg, D. M. Alexander, O. Almaini, I. Aretxaga, T. Babbedge, P.Ñ. Best, A. Blain, S. Chapman, D. L. Clements, M. Crawford, L. Dunne, S. A. Eales, A. C. Edge, D. Farrah, E. Gaztañaga, W. K. Gear, G. L. Granato, T. R. Greve, M. Fox, R. J. Ivison, M. J. Jarvis, T. Jenness, C. Lacey, K. Lepage, R. G. Mann, G. Marsden, A. Martinez-Sansigre, S. Oliver, M. J. Page, J. A. Peacock, C. P. Pearson, W. J. Percival, R. S. Priddey, S. Rawlings, M. Rowan-Robinson, R. S. Savage, M. Seigar, K. Sekiguchi, L. Silva, C. Simpson, I. Smail, J. A. Stevens, T. Takagi, M. Vaccari, E. van Kampen, and C. J. Willott. The SCUBA Half-Degree Extragalactic Survey II. Submillimetre maps, catalogue and number counts. MNRAS, 372:1621–1652, November 2006.
- [30] K. Coppin, M. Halpern, D. Scott, C. Borys, J. Dunlop, L. Dunne, R. Ivison, J. Wagg, I. Aretxaga, E. Battistelli, A. Benson, A. Blain, S. Chapman, D. Clements, S. Dye, D. Farrah, D. Hughes, T. Jenness, E. van Kampen, C. Lacey, A. Mortier, A. Pope, R. Priddey, S. Serjeant, I. Smail, J. Stevens, and M. Vaccari. The SCUBA HAlf Degree

- Extragalactic Survey VI. 350- μ m mapping of submillimetre galaxies. MNRAS, 384:1597–1610, March 2008.
- [31] L. L. Cowie, A. Songaila, E. M. Hu, and J. G. Cohen. New Insight on Galaxy Formation and Evolution From Keck Spectroscopy of the Hawaii Deep Fields. AJ, 112:839—+, September 1996.
- [32] M. Davis, G. Efstathiou, C. S. Frenk, and S. D. M. White. The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter. ApJ, 292:371–394, May 1985.
- [33] M. J. Devlin, P. A. R. Ade, I. Aretxaga, J. J. Bock, E. L. Chapin, M. Griffin, J. O. Gundersen, M. Halpern, P. C. Hargrave, D. H. Hughes, J. Klein, G. Marsden, P. G. Martin, P. Mauskopf, L. Moncelsi, C. B. Netterfield, H. Ngo, L. Olmi, E. Pascale, G. Patanchon, M. Rex, D. Scott, C. Semisch, N. Thomas, M. D. P. Truch, C. Tucker, G. S. Tucker, M. P. Viero, and D. V. Wiebe. Over half of the far-infrared background light comes from galaxies at z≥1.2. Nature, 458:737-739, April 2009.
- [34] M. Dickinson and GOODS Legacy Team. The Great Observatories Origins Deep Survey (GOODS). In Bulletin of the American Astronomical Society, volume 33 of Bulletin of the American Astronomical Society, pages 820–+, May 2001.
- [35] H. Dole, G. Lagache, J.-L. Puget, K. I. Caputi, N. Fernández-Conde, E. Le Floc'h, C. Papovich, P. G. Pérez-González, G. H. Rieke, and M. Blaylock. The cosmic infrared background resolved by Spitzer. Contributions of mid-infrared galaxies to the far-infrared background. A&A, 451:417–429, May 2006.
- [36] N. Drory, M. Salvato, A. Gabasch, R. Bender, U. Hopp, G. Feulner, and M. Pannella. The Stellar Mass Function of Galaxies to z~5 in the FORS Deep and GOODS-South Fields. ApJ, 619:L131–L134, February 2005.
- [37] J. S. Dunlop. SHADES: The Scuba HAlf Degree Extragalactic Survey. In R. de Grijs and R. M. González Delgado, editors, *Starbursts: From 30 Doradus to Lyman Break Galaxies*, volume 329 of *Astrophysics and Space Science Library*, pages 121—+, May 2005.

[38] L. Dunne, S. A. Eales, and M. G. Edmunds. A census of metals at high and low redshift and the connection between submillimetre sources and spheroid formation. MNRAS, 341:589–598, May 2003.

- [39] S. Dye, P. A. R. Ade, J. J. Bock, E. L. Chapin, M. J. Devlin, J. S. Dunlop, S. A. Eales, M. Griffin, J. O. Gundersen, M. Halpern, P. C. Hargrave, D. H. Hughes, J. Klein, B. Magnelli, G. Marsden, P. Mauskopf, L. Moncelsi, C. B. Netterfield, L. Olmi, E. Pascale, G. Patanchon, M. Rex, D. Scott, C. Semisch, T. Targett, N. Thomas, M. D. P. Truch, C. Tucker, G. S. Tucker, M. P. Viero, and D. V. Wiebe. Radio and mid-infrared identification of BLAST source counterparts in the Chandra Deep Field South. ArXiv e-prints, April 2009.
- [40] S. Dye, S. A. Eales, I. Aretxaga, S. Serjeant, J. S. Dunlop, T. S. R. Babbedge, S. C. Chapman, M. Cirasuolo, D. L. Clements, K. E. K. Coppin, L. Dunne, E. Egami, D. Farrah, R. J. Ivison, E. van Kampen, A. Pope, R. Priddey, G. H. Rieke, A. M. Schael, D. Scott, C. Simpson, T. Takagi, T. Takata, and M. Vaccari. The SCUBA HAlf Degree Extragalactic Survey (SHADES) VII. Optical/IR photometry and stellar masses of submillimetre galaxies. MNRAS, 386:1107–1130, May 2008.
- [41] S. Eales. The Herschel Space Observatory uncovering the hidden universe. In 37th COSPAR Scientific Assembly, volume 37 of COSPAR, Plenary Meeting, pages 776-+, 2008.
- [42] S. Eales, S. Lilly, T. Webb, L. Dunne, W. Gear, D. Clements, and M. Yun. The Canada-UK Deep Submillimeter Survey. IV. The Survey of the 14 Hour Field. AJ, 120:2244–2268, November 2000.
- [43] 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 Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference, pages 763–772, October 2004.
- [44] J. Glenn, J. J. Bock, G. Chattopadhyay, S. F. Edgington, A. E. Lange, J. Zmuidzinas, P. D. Mauskopf, B. Rownd, L. Yuen, and P. A. Ade. Bolocam: a millimeter-wave bolometric camera. In T. G. Phillips, editor, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conferen-

- ce Series, volume 3357 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, pages 326–334, July 1998.
- [45] T. R. Greve, F. Bertoldi, I. Smail, R. Neri, S. C. Chapman, A. W. Blain, R. J. Ivison, R. Genzel, A. Omont, P. Cox, L. Tacconi, and J.-P. Kneib. An interferometric CO survey of luminous submillimetre galaxies. MNRAS, 359:1165–1183, May 2005.
- [46] T. R. Greve, R. J. Ivison, F. Bertoldi, J. A. Stevens, J. S. Dunlop, D. Lutz, and C. L. Carilli. A 1200- μ m MAMBO survey of ELAISN2 and the Lockman Hole I. Maps, sources and number counts. MNRAS, 354:779–797, November 2004.
- [47] T. R. Greve, A. Pope, D. Scott, R. J. Ivison, C. Borys, C. J. Conselice, and F. Bertoldi. A 1200- μ m MAMBO survey of the GOODS-N field: a significant population of submillimetre dropout galaxies. MNRAS, 389:1489–1506, October 2008.
- [48] M. J. Griffin, B. M. Swinyard, and L. Vigroux. The SPIRE Instrument for Herschel. In G. L. Pilbratt, J. Cernicharo, A. M. Heras, T. Prusti, and R. Harris, editors, *The Promise of the Herschel Space Observatory*, volume 460 of *ESA Special Publication*, pages 37—+, July 2001.
- [49] A. Heavens, B. Panter, R. Jimenez, and J. Dunlop. The star-formation history of the Universe from the stellar populations of nearby galaxies. Nature, 428:625–627, April 2004.
- [50] W. Holland, M. MacIntosh, A. Fairley, D. Kelly, D. Montgomery, D. Gostick, E. Atad-Ettedgui, M. Ellis, I. Robson, M. Hollister, A. Woodcraft, P. Ade, I. Walker, K. Irwin, G. Hilton, W. Duncan, C. Reintsema, A. Walton, W. Parkes, C. Dunare, M. Fich, J. Kycia, M. Halpern, D. Scott, A. Gibb, J. Molnar, E. Chapin, D. Bintley, S. Craig, T. Chylek, T. Jenness, F. Economou, and G. Davis. SCUBA-2: a 10,000-pixel submillimeter camera for the James Clerk Maxwell Telescope. In Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, volume 6275 of Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference, July 2006.
- [51] 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.

- [52] D. H. Hughes. The Large Millimetre Telescope (LMT): tracing the evolution of structure in the early universe. In S. Torres-Peimbert and G. MacAlpine, editors, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, volume 23 of Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica, vol. 27, pages 97–100, October 2005.
- [53] D. H. Hughes, I. Aretxaga, E. Chapin, and E. Gaztañaga. Balloon-borne and ground-based sub-millimetre cosmological surveys: Breaking the "redshift deadlock". In M. de Petris and M. Gervasi, editors, Experimental Cosmology at Millimetre Wavelengths, volume 616 of American Institute of Physics Conference Series, pages 322–329, May 2002.
- [54] D. H. Hughes, I. Aretxaga, E. L. Chapin, E. Gaztañaga, J. S. Dunlop, M. J. Devlin, M. Halpern, J. Gundersen, J. Klein, C. B. Netterfield, L. Olmi, D. Scott, and G. Tucker. Breaking the 'redshift deadlock'- I. Constraining the star formation history of galaxies with submillimetre photometric redshifts. MNRAS, 335:871–882, October 2002.
- [55] D. H. Hughes, S. Serjeant, J. Dunlop, M. Rowan-Robinson, A. Blain, R. G. Mann, R. Ivison, J. Peacock, A. Efstathiou, W. Gear, S. Oliver, A. Lawrence, M. Longair, P. Goldschmidt, and T. Jenness. High-redshift star formation in the Hubble Deep Field revealed by a submillimetre-wavelength survey. Nature, 394:241–247, July 1998.
- [56] R. J. Ivison, J. S. Dunlop, I. Smail, A. Dey, M. C. Liu, and J. R. Graham. An Excess of Submillimeter Sources near 4C 41.17: A Candidate Protocluster at Z = 3.8? ApJ, 542:27–34, October 2000.
- [57] R. J. Ivison, T. R. Greve, J. S. Dunlop, J. A. Peacock, E. Egami, I. Smail, E. Ibar, E. van Kampen, I. Aretxaga, T. Babbedge, A. D. Biggs, A. W. Blain, S. C. Chapman, D. L. Clements, K. Coppin, D. Farrah, M. Halpern, D. H. Hughes, M. J. Jarvis, T. Jenness, J. R. Jones, A. M. J. Mortier, S. Oliver, C. Papovich, P. G. Pérez-González, A. Pope, S. Rawlings, G. H. Rieke, M. Rowan-Robinson, R. S. Savage, D. Scott, M. Seigar, S. Serjeant, C. Simpson, J. A. Stevens, M. Vaccari, J. Wagg, and C. J. Willott. The SCUBA HAlf Degree Extragalactic Survey III. Identification of radio and mid-infrared counterparts to submillimetre galaxies. MNRAS, 380:199–228, September 2007.

[58] R. J. Ivison, T. R. Greve, I. Smail, J. S. Dunlop, N. D. Roche, S. E. Scott, M. J. Page, J. A. Stevens, O. Almaini, A. W. Blain, C. J. Willott, M. J. Fox, D. G. Gilbank, S. Serjeant, and D. H. Hughes. Deep radio imaging of the SCUBA 8-mJy survey fields: submillimetre source identifications and redshift distribution. MNRAS, 337:1–25, November 2002.

- [59] G. Kauffmann and S. D. M. White. The merging history of dark matter haloes in a hierarchical universe. MNRAS, 261:921–928, April 1993.
- [60] R. C. Kennicutt, Jr. Star Formation in Galaxies Along the Hubble Sequence. ARA&A, 36:189–232, 1998.
- [61] M. F. Kessler, J. A. Steinz, M. E. Anderegg, J. Clavel, G. Drechsel, P. Estaria, J. Faelker, J. R. Riedinger, A. Robson, B. G. Taylor, and S. Ximénez de Ferrán. The Infrared Space Observatory (ISO) mission. A&A, 315:L27–L31, November 1996.
- [62] A. Kovács, S. C. Chapman, C. D. Dowell, A. W. Blain, R. J. Ivison, I. Smail, and T. G. Phillips. SHARC-2 350 μ m Observations of Distant Submillimeter-selected Galaxies. ApJ, 650:592–603, October 2006.
- [63] E. Kreysa, H.-P. Gemuend, J. Gromke, C. G. Haslam, L. Reichertz, E. E. Haller, J. W. Beeman, V. Hansen, A. Sievers, and R. Zylka. Bolometer array development at the Max-Planck-Institut fuer Radioastronomie. In T. G. Phillips, editor, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, volume 3357 of Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference, pages 319–325, July 1998.
- [64] M. Krumholz, S. E. Thorsett, and F. A. Harrison. Gamma-Ray Bursts and the Cosmic Star Formation Rate. ApJ, 506:L81–L84, October 1998.
- [65] R. Kurz and P. Shaver. The ALMA project. The Messenger, 96:7–11, June 1999.
- [66] R. B. Larson. Infall of Matter in Galaxies. Nature, 236:21–23, March 1972.
- [67] G. T. Laurent, J. Aguirre, J. Bock, S. Edgington, M. Enoch, J. Glenn, A. Goldin, S. Golwala, D. Haig, P. Maloney, P. Mauskopf, H. Hguyen,

P. Rossinot, J. Sayers, and P. Stover. Bolocam 1.1-millimeter Galaxy Survey of the Lockman Hole. In *Bulletin of the American Astronomical Society*, volume 36 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, pages 729–+, May 2004.

- [68] S. J. Lilly, L. Tresse, F. Hammer, D. Crampton, and O. Le Fevre. The Canada-France Redshift Survey. VI. Evolution of the Galaxy Luminosity Function to Z approximately 1. ApJ, 455:108–+, December 1995.
- [69] L. B. Lucy. An iterative technique for the rectification of observed distributions. AJ, 79:745-+, June 1974.
- [70] M. A. Malkan and F. W. Stecker. An Empirically Based Model for Predicting Infrared Luminosity Functions, Deep Infrared Galaxy Counts, and the Diffuse Infrared Background. ApJ, 555:641–649, July 2001.
- [71] G. Marsden, P. A. R. Ade, J. J. Bock, E. L. Chapin, M. J. Devlin, S. R. Dicker, M. Griffin, J. O. Gundersen, M. Halpern, P. C. Hargrave, D. H. Hughes, J. Klein, P. Mauskopf, B. Magnelli, L. Moncelsi, C. B. Netterfield, H. Ngo, L. Olmi, E. Pascale, G. Patanchon, M. Rex, D. Scott, C. Semisch, N. Thomas, M. D. P. Truch, C. Tucker, G. S. Tucker, M. P. Viero, and D. V. Wiebe. BLAST: Resolving the Cosmic Submillimeter Background. ArXiv e-prints, April 2009.
- [72] H. Matsuhara, T. Wada, S. Matsuura, T. Nakagawa, M. Kawada, Y. Ohyama, C. P. Pearson, S. Oyabu, T. Takagi, S. Serjeant, G. J. White, H. Hanami, H. Watarai, T. T. Takeuchi, T. Kodama, N. Arimoto, S. Okamura, H. M. Lee, S. Pak, M. S. Im, M. G. Lee, W. Kim, W.-S. Jeong, K. Imai, N. Fujishiro, M. Shirahata, T. Suzuki, C. Ihara, and I. Sakon. Deep Extragalactic Surveys around the Ecliptic Poles with AKARI (ASTRO-F). PASJ, 58:673–694, August 2006.
- [73] A. M. J. Mortier, S. Serjeant, J. S. Dunlop, S. E. Scott, P. Ade, D. Alexander, O. Almaini, I. Aretxaga, C. Baugh, A. J. Benson, P.Ñ. Best, A. Blain, J. Bock, C. Borys, A. Bressan, C. Carilli, E. L. Chapin, S. Chapman, D. L. Clements, K. Coppin, M. Crawford, M. Devlin, S. Dicker, L. Dunne, S. A. Eales, A. C. Edge, D. Farrah, M. Fox, C. Frenk, E. Gaztañaga, W. K. Gear, E. Gonzales-Solares, G. L. Granato, T. R. Greve, J. A. Grimes, J. Gundersen, M. Halpern, P. Hargrave, D. H. Hughes, R. J. Ivison, M. J. Jarvis, T. Jenness, R. Jimenez, E. van Kampen, A. King, C. Lacey, A. Lawrence, K. Lepage, R. G.

Mann, G. Marsden, P. Mauskopf, B. Netterfield, S. Oliver, L. Olmi, M. J. Page, J. A. Peacock, C. P. Pearson, W. J. Percival, A. Pope, R. S. Priddey, S. Rawlings, N. Roche, M. Rowan-Robinson, D. Scott, K. Sekiguchi, M. Seigar, L. Silva, C. Simpson, I. Smail, J. A. Stevens, T. Takagi, G. Tucker, C. Vlahakis, I. Waddington, J. Wagg, M. Watson, C. Willott, and M. Vaccari. The SCUBA Half-Degree Extragalactic Survey - I. Survey motivation, design and data processing. MNRAS, 363:563–580, October 2005.

- [74] E. Pascale, P. A. R. Ade, J. J. Bock, E. L. Chapin, J. Chung, M. J. Devlin, S. Dicker, M. Griffin, J. O. Gundersen, M. Halpern, P. C. Hargrave, D. H. Hughes, J. Klein, C. J. MacTavish, G. Marsden, P. G. Martin, T. G. Martin, P. Mauskopf, C. B. Netterfield, L. Olmi, G. Patanchon, M. Rex, D. Scott, C. Semisch, N. Thomas, M. D. P. Truch, C. Tucker, G. S. Tucker, M. P. Viero, and D. V. Wiebe. The Balloon-borne Large Aperture Submillimeter Telescope: BLAST. ApJ, 681:400–414, July 2008.
- [75] E. Pascale, P. A. R. Ade, J. J. Bock, E. L. Chapin, M. J. Devlin, S. Dye, S. A. Eales, M. Griffin, J. O. Gundersen, M. Halpern, P. C. Hargrave, D. H. Hughes, J. Klein, G. Marsden, P. Mauskopf, L. Moncelsi, C. B. Netterfield, L. Olmi, G. Patanchon, M. Rex, D. Scott, C. Semisch, N. Thomas, M. D. P. Truch, C. Tucker, G. S. Tucker, M. P. Viero, and D. V. Wiebe. BLAST: A Far-Infrared Measurement of the History of Star Formation. ArXiv e-prints, April 2009.
- [76] P. J. E. Peebles. Large-scale background temperature and mass fluctuations due to scale-invariant primeval perturbations. ApJ, 263:L1–L5, December 1982.
- [77] T. A. Perera, E. L. Chapin, J. E. Austermann, K. S. Scott, G. W. Wilson, M. Halpern, A. Pope, D. Scott, M. S. Yun, J. D. Lowenthal, G. Morrison, I. Aretxaga, J. J. Bock, K. Coppin, M. Crowe, L. Frey, D. H. Hughes, Y. Kang, S. Kim, and P. D. Mauskopf. An AzTEC 1.1mm survey of the GOODS-N field I. Maps, catalogue and source statistics. MNRAS, 391:1227–1238, December 2008.
- [78] M. Rex, P. A. R. Ade, I. Aretxaga, J. J. Bock, E. L. Chapin, M. J. Devlin, S. R. Dicker, M. Griffin, J. O. Gundersen, M. Halpern, P. C. Hargrave, D. H. Hughes, J. Klein, G. Marsden, P. G. Martin, P. Mauskopf, C. B. Netterfield, L. Olmi, E. Pascale, G. Patanchon, D. Scott, C. Semisch, N. Thomas, M. D. P. Truch, C. Tucker, G. S. Tucker,

M. P. Viero, and D. V. Wiebe. A Bright Submillimeter Source in the Bullet Cluster (1E0657–56) Field Detected with BLAST. *ArXiv e-prints*, April 2009.

- [79] M. Rowan-Robinson. Hyperluminous infrared galaxies. MNRAS, 316:885–900, August 2000.
- [80] M. Rowan-Robinson, R. G. Mann, S. J. Oliver, A. Efstathiou, N. Eaton, P. Goldschmidt, B. Mobasher, S. B. G. Serjeant, T. J. Sumner, L. Danese, D. Elbaz, A. Franceschini, E. Egami, M. Kontizas, A. Lawrence, R. McMahon, H. U. Norgaard-Nielsen, I. Perez-Fournon, and J. I. Gonzalez-Serrano. Observations of the Hubble Deep Field with the Infrared Space Observatory V. Spectral energy distributions, starburst models and star formation history. MNRAS, 289:490–496, August 1997.
- [81] A. Sandage, B. Binggeli, and G. A. Tammann. Studies of the Virgo Cluster - Part Five - Luminosity Functions of Virgo Cluster Galaxies. AJ, 90:1759–1771, September 1985.
- [82] D. B. Sanders and I. F. Mirabel. Luminous Infrared Galaxies. ARA&A, 34:749-+, 1996.
- [83] D. B. Sanders, J. A. Surace, and C. M. Ishida. Ultraluminous Infrared Galaxies. In J. E. Barnes and D. B. Sanders, editors, Galaxy Interactions at Low and High Redshift, volume 186 of IAU Symposium, pages 289-+, 1999.
- [84] W. Saunders, M. Rowan-Robinson, A. Lawrence, G. Efstathiou, N. Kaiser, R. S. Ellis, and C. S. Frenk. The 60-micron and far-infrared luminosity functions of IRAS galaxies. MNRAS, 242:318–337, January 1990.
- [85] R. Scaramella, R. Cen, and J. P. Ostriker. A Hydrodynamic Approach to Cosmology: Nonlinear Effects on Cosmic Backgrounds in the Cold Dark Matter Model. ApJ, 416:399-+, October 1993.
- [86] P. Schechter. An analytic expression for the luminosity function for galaxies. ApJ, 203:297–306, January 1976.
- [87] 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.
- [88] M. Schmidt. Space Distribution and Luminosity Functions of Quasi-Stellar Radio Sources. ApJ, 151:393-+, February 1968.
- [89] D. Scott and C. A. Tout. Nearest neighbour analysis of random distributions on a sphere. MNRAS, 241:109–117, November 1989.
- [90] 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, 385:2225–2238, April 2008.
- [91] S. E. Scott, M. J. Fox, J. S. Dunlop, S. Serjeant, J. A. Peacock, R. J. Ivison, S. Oliver, R. G. Mann, A. Lawrence, A. Efstathiou, M. Rowan-Robinson, D. H. Hughes, E.Ñ. Archibald, A. Blain, and M. Longair. The SCUBA 8-mJy survey I. Submillimetre maps, sources and number counts. MNRAS, 331:817–838, April 2002.
- [92] S. Serjeant, S. Dye, A. Mortier, J. Peacock, E. Egami, M. Cirasuolo, G. Rieke, C. Borys, S. Chapman, D. Clements, K. Coppin, J. Dunlop, S. Eales, D. Farrah, M. Halpern, P. Mauskopf, A. Pope, M. Rowan-Robinson, D. Scott, I. Smail, and M. Vaccari. The SCUBA Half Degree Extragalactic Survey (SHADES) IX. The environment, mass and redshift dependence of star formation. MNRAS, 386:1907–1921, June 2008.
- [93] R. K. Sheth. On estimating redshift and luminosity distributions in photometric redshift surveys. MNRAS, 378:709–715, June 2007.
- [94] H. Shibai. AKARI (ASTRO-F): Flight performance and preliminary results. In 36th COSPAR Scientific Assembly, volume 36 of COSPAR, Plenary Meeting, pages 3422—+, 2006.
- [95] I. Smail, R. J. Ivison, and A. W. Blain. A Deep Sub-millimeter Survey of Lensing Clusters: A New Window on Galaxy Formation and Evolution. ApJ, 490:L5+, November 1997.
- [96] I. Smail, R. J. Ivison, A. W. Blain, and J.-P. Kneib. The nature of faint submillimetre-selected galaxies. MNRAS, 331:495–520, March 2002.

[97] I. Smail, R. J. Ivison, F.Ñ. Owen, A. W. Blain, and J.-P. Kneib. Radio Constraints on the Identifications and Redshifts of Submillimeter Galaxies. ApJ, 528:612–616, January 2000.

- [98] Y. Tamura, K. Kohno, K. Nakanishi, B. Hatsukade, D. Iono, G. W. Wilson, M. S. Yun, T. Takata, Y. Matsuda, T. Tosaki, H. Ezawa, T. A. Perera, K. S. Scott, J. E. Austermann, D. H. Hughes, I. Aretxaga, A. Chung, T. Oshima, N. Yamaguchi, K. Tanaka, and R. Kawabe. Spatial correlation between submillimetre and Lyman-α galaxies in the SSA22 protocluster. Nature, 459:61–63, May 2009.
- [99] N. R. Tanvir, V. E. Barnard, A. W. Blain, A. S. Fruchter, C. Kouveliotou, P. Natarajan, E. Ramirez-Ruiz, E. Rol, I. A. Smith, R. P. J. Tilanus, and R. A. M. J. Wijers. The submillimetre properties of gamma-ray burst host galaxies. MNRAS, 352:1073–1080, August 2004.
- [100] H. A. Thronson, Jr. and C. M. Telesco. Star formation in active dwarf galaxies. ApJ, 311:98–112, December 1986.
- [101] R. P. J. Tilanus, T. Jenness, F. Economou, and S. Cockayne. The JCMT Telescope Management System. In G. Hunt and H. Payne, editors, Astronomical Data Analysis Software and Systems VI, volume 125 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, pages 397—+, 1997.
- [102] E. van Kampen, W. J. Percival, M. Crawford, J. S. Dunlop, S. E. Scott, N. Bevis, S. Oliver, F. Pearce, S. T. Kay, E. Gaztañaga, D. H. Hughes, and I. Aretxaga. The extragalactic submillimetre population: predictions for the SCUBA Half-Degree Extragalactic Survey (SHADES). MNRAS, 359:469–480, May 2005.
- [103] R. L. White, D. J. Helfand, R. H. Becker, E. Glikman, and W. de Vries. Signals from the Noise: Image Stacking for Quasars in the FIRST Survey. ApJ, 654:99–114, January 2007.
- [104] 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.
- [105] J. D. Younger, G. G. Fazio, J.-S. Huang, M. S. Yun, G. W. Wilson, M. L.Ñ. Ashby, M. A. Gurwell, K. Lai, A. B. Peck, G. R. Petitpas, D. J.

Wilner, D. Iono, K. Kohno, R. Kawabe, D. H. Hughes, I. Aretxaga, T. Webb, A. Martínez-Sansigre, S. Kim, K. S. Scott, J. Austermann, T. Perera, J. D. Lowenthal, E. Schinnerer, and V. Smolčić. Evidence for a Population of High-Redshift Submillimeter Galaxies from Interferometric Imaging. ApJ, 671:1531–1537, December 2007.

- [106] J. D. Younger, A. Omont, N. Fiolet, J.-S. Huang, G. G. Fazio, K. Lai, M. Polletta, D. Rigopoulou, and R. Zylka. A millimetre survey of starburst dominated ultraluminous infrared galaxies at z $^{\sim}$ 2. MNRAS, 394:1685–1694, April 2009.
- [107] S. Zibetti, B. Ménard, D. Nestor, and D. Turnshek. Constraining the Photometric Properties of Mg II-absorbing Galaxies with the Sloan Digital Sky Survey. ApJ, 631:L105–L108, October 2005.