

# Capítulo 7

## Instrumentos científicos

### 7.1. Introducción

El GTM y sus instrumentos formarán una infraestructura poderosa y única, para llevar a cabo investigación de frontera en astrofísica. El área colectora del GTM es de casi 2000 m<sup>2</sup>, y por lo tanto será el telescopio con mayor sensibilidad en el intervalo de 1 a 3 mm.

Tratándose de un telescopio de gran apertura, equipado con bolómetros y arreglos heterodinos, tendrá una sensibilidad ideal para detectar la emisión de bajo brillo superficial, con una resolución angular de 6 a 12 seg de arco. Su sensibilidad, combinada con las características de imagen, serán complementarias a las propiedades de otros telescopios en operación, como el Telescopio Green Bank de 100 m (GBT), el Arreglo Combinado para Investigación en Astronomía Milimétrica (CARMA), el Telescopio Espacial Hubble (HST), Spitzer y otros programados a futuro, como el Arreglo Milimétrico de Ata-

cama (ALMA), el proyecto Herschel y el Telescopio Espacial James Webb, entre otros.

Las comas planetarias, los discos estelares, las regiones de formación estelar y las galaxias distantes contienen gas y polvo que se podrán observar con el GTM, tanto en el continuo como en líneas espectrales. Debido a que la emisión de partículas de polvo es casi siempre ópticamente delgada, las observaciones en el continuo milimétrico dan una estimación de la masa total en la línea de visión. Por otro lado, las observaciones de las líneas espectrales de una región permiten conocer la velocidad, la química, la densidad del gas, así como la temperatura. A continuación se describe la primera generación de instrumentos construidos para el GTM, que consiste en receptores de continuo, heterodinos y espectrómetros. Asimismo, se mencionan los planes para la siguiente generación de instrumentos.

## **7.2. Primera generación de cámaras de continuo**

En la actualidad, una de las características científicas más innovadoras de los telescopios milimétricos es el uso de arreglos de receptores, para tomar imágenes de grandes áreas del cielo. El GTM tendrá una velocidad de cartografía un orden de magnitud mayor que la de ALMA en su configuración compacta, que permitirá el descubrimiento de miles de fuentes, que posteriormente podrán ser observadas a mayor resolución con ALMA. Por otro lado, la flexibilidad de la primera generación de instrumentos del GTM ofre-

ce la posibilidad de dar seguimiento a objetos recién descubiertos con otros instrumentos especializados.

A continuación se describen los dos sistemas de bolómetros que se están construyendo como primera generación de instrumentos para el continuo. La Cámara Astronómica de Emisión Térmica AzTEC, es un arreglo de 144 bolómetros diseñada para hacer imagen profunda, de campo grande. La Cámara de Distribuciones Espectrales de Energía SPEED, es un arreglo de 4 pixeles. Cada pixel puede observar simultáneamente en 4 bandas de frecuencia con la misma resolución angular. SPEED se usará como un instrumento de seguimiento para hacer fotometría de las fuentes descubiertas en los campos de AzTEC. El uso concertado de ambas, permitirá detectar y caracterizar la distribución espectral de energía de una gran variedad de fuentes a bajos y altos corrimientos al rojo.

### **7.2.1. AzTEC**

AzTEC, por Astronomical Thermal Emission Camera, es un arreglo de bolómetros desarrollado en UMass Amherst, en colaboración con el equipo que construyó la cámara Bolocam<sup>[1]</sup>, en el que participaron miembros de Caltech, el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL), la Universidad de Colorado y la Universidad de Cardiff. El concepto de AzTEC es el mismo que el de Bolocam, pero ha habido cambios significativos para mejorar su desempeño y simplificar la operación.

El arreglo de detectores comprende 144 bolómetros de nitrato de silicio, tipo micromalla, fabricados en la misma oblea de silicio. El arreglo opera a



Figura 7.1: Imagen de un cúmulo de galaxias a  $z = 0.7$ , tomada por el satélite de rayos X Chandra. Se ha propuesto observar este cúmulo con AzTEC. [Créditos: D. Q. Wang, UMass Amherst y NASA/CXC/SAO.]

1.1, 1.4 y 2.1 mm. No obstante, sólo una de estas bandas estará disponible por temporada de observación. El arreglo de bolómetros se enfría por medio de un refrigerador de ciclo cerrado de tres etapas, fabricado especialmente para el proyecto por Chase Research Cryogenics, Ltd. Utiliza las propiedades de absorción que dependen de la temperatura del carbón para operar tres bombas de helio ( $^4\text{He}/^3\text{He}/^3\text{He}$ ). La etapa ultra fría opera a temperaturas de 250 mK y está acoplada térmicamente al arreglo de bolómetros. Esta etapa está protegida por un estado intermedio de 360 mK. Las partes mecánicas, así como los cables, están acoplados térmicamente al estado intermedio, antes de conectarse a la carga de resistencias y bolómetros que se encuentran a 250 mK. Diversas pruebas en el laboratorio han demostrado que la temperatura de operación se puede mantener 48 horas, sin carga óptica o de cableado, y se espera que dure más de 24 horas con las condiciones de carga esperadas. La

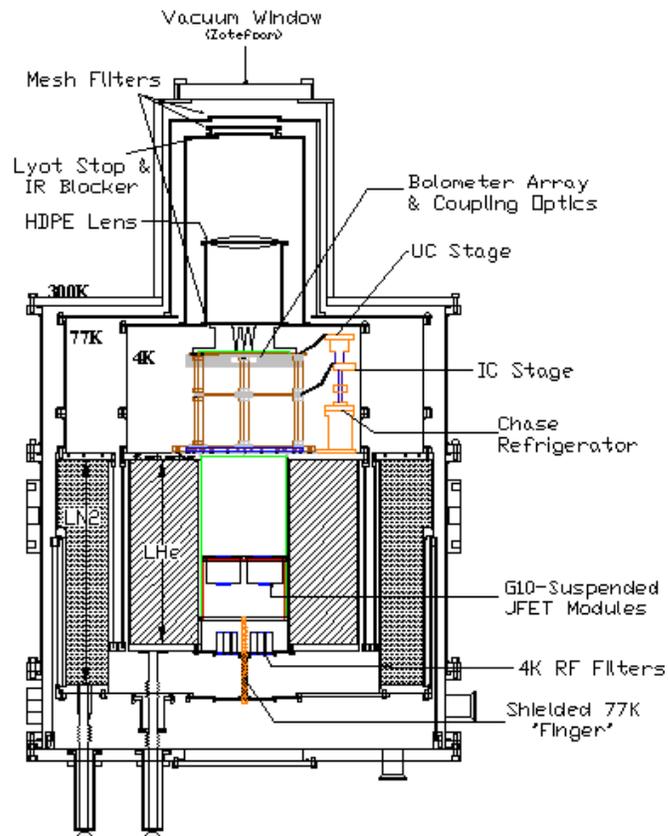


Figura 7.2: Diagrama de la sección transversal del criostato de AzTEC, donde se muestra la electrónica fría. [Créditos: G. Wilson, UMass Amherst/FCRAO].

operación del refrigerador se controla automáticamente, por computadora, y está integrada al resto del instrumento.

Se diseñó un nuevo criostato de aluminio que consiste de dos tanques concéntricos de helio y nitrógeno líquido con capacidades de 23 y 26 litros, respectivamente. Incluyendo la óptica y un sólo ciclo de refrigeración por día, se espera que la temperatura de operación se mantenga por 48 horas y esté limitada únicamente por el volumen de helio líquido. La flexibilidad en el diseño permitirá que el criostato se pueda usar para otros instrumentos como SPEED.

Una mejora, respecto al instrumento antecesor Bolocam, es la electrónica de lectura de AzTEC. Ha sido diseñada para minimizar el camino de la señal analógica, simplificando las conexiones eléctricas entre la electrónica de la parte frontal y la de la parte posterior. Asimismo, elimina las conexiones a tierra entre todas las computadoras y el radiómetro. La arquitectura del sistema utiliza conexiones de fibra óptica bajo el protocolo AES/EBU para mandar, distribuir señales de reloj y señales de transmisión. Todos los relojes del sistema se derivan de un solo cristal maestro que reside en la electrónica de la parte posterior.

Podemos estimar la sensibilidad proyectada por el sistema completo AzTEC/GTM usando la teoría de ruido de Mather<sup>[2]</sup>. Suponiendo una eficiencia de acoplamiento de los bolómetros de 0.15, una carga total del telescopio de 54 K incluyendo los espejos de acoplamiento de los receptores, una eficiencia del telescopio de 0.40 a 1.1 mm, y que se observa a través de una atmósfera

Tabla 7.1: Sensibilidades y parámetros ópticos para AzTEC funcionando en el GTM a 1.1 mm, con las suposiciones descritas en el texto. [Créditos: G. Wilson, UMass Amherst/FCRAO].

---

Tamaño del haz [seg de arco]	7
Campo de visión [min de arco <sup>2</sup> ]	2.4
Vel. de cartografía [grados <sup>2</sup> /hr/mJy <sup>2</sup> ]	0.36
Potencia equivalente de ruido [ $10^{-18}$ W/ $\sqrt{Hz}$ ]	93
Temperatura equivalente de ruido [mK/ $\sqrt{Hz}$ ]	1400
Densidad de flujo equivalente de ruido [mJy/ $\sqrt{Hz}$ ]	2.95

---

con 2 mm de vapor de agua precipitable, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 7.1.

Como AzTEC estará terminado antes de que el GTM entre en operación, será instalado, temporalmente, en otros telescopios. En junio del 2005, se llevó a cabo una temporada de pruebas en el Telescopio James C. Maxwell, en Hawaii, muy exitosa.

### 7.2.2. SPEED

La cámara SPEED, por SPEctral Energy Distribution Camera, es capaz de observar cuatro bandas de frecuencia simultáneamente<sup>[3]</sup>. Se trata de

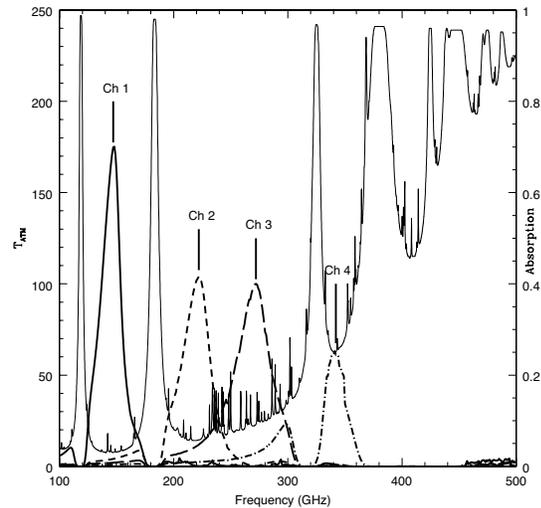


Figura 7.3: Modelo de la temperatura atmosférica efectiva considerando 2 mm de vapor de agua precipitable en el sitio del GTM. Los canales de SPEED se muestran sobre el modelo. [Créditos: G. Wilson, UMass Amherst/FCRAO].

un proyecto financiado por la NASA, como un instrumento prototipo para demostrar una nueva tecnología de detectores: los bolómetros de frecuencia selectiva. El instrumento ha sido desarrollado en UMass Amherst en colaboración con el Centro Espacial Goddard de la NASA y la Universidad de Chicago.

La cámara está configurada como un arreglo de 2 x 2 elementos de imagen o pixeles, donde cada uno alberga 4 bolómetros que operan a 2.1, 1.3, 1.1 y 0.85 mm, respectivamente. SPEED mide la distribución espectral de energía milimétrica de una fuente en una sola observación, eliminando la necesidad de observar varias veces el mismo objeto con distintos filtros.

A diferencia de los bolómetros de banda ancha tradicionales, que requieren

filtros externos para definir la banda del detector, los de frecuencia selectiva usan un filtro de interferencia cuasi óptico como un absorbedor de potencia. Cada detector absorbe una banda de radiación angosta y permite que toda la radiación, fuera de esa banda, pase sin ninguna pérdida. Usándolos en cascada y sintonizándolos a diferentes frecuencias de absorción, es posible crear un pixel multi-frecuencia compacto, de tal forma que la cobertura espectral esté limitada por el ancho de banda disponible en el plano focal del telescopio y no por la masa y el tamaño del criostato, como en el caso de los sistemas que usan filtros dicroicos.

En la figura 7.3 se muestran las bandas de frecuencia de los cuatro canales de SPEED, sobre un modelo de la atmósfera del sitio del GTM. Diseñando las propiedades geométricas de los filtros de interferencia y combinándolos con filtros que bloquean ciertas bandas, se maximiza el ancho de banda de cada uno de los canales de SPEED, limitando la contribución de las líneas de oxígeno y del agua de la atmósfera.

Los termistores de los bolómetros de frecuencia selectiva son sensores superconductores, polarizados por voltaje, formados por una bi-capa de molybdeno/oro. Se enfrían a 250 mK vía un refrigerador de  $^3\text{He}$ . Se polarizan a la región de transición, aplicando una corriente a través de una resistencia en paralelo con el sensor. Una retroalimentación electrotérmica fuerte mantiene el superconductor en la región de transición y casi isotérmico.

La caracterización de los detectores prototipo llevada a cabo en UMass Amherst y en el Centro Goddard de la NASA, ha demostrado la repetibi-

Tabla 7.2: Sensibilidad calculada para SPEED funcionando en el GTM, con las suposiciones descritas en el texto. [Créditos: G. Wilson, UMass Amherst/FCRAO].

---

Canal	1	2	3	4
Frecuencia central [GHz]	145	214	273	375
Tamaño del haz [seg de arco]	11	11	11	11
Potencia equivalente de ruido [ $10^{-18}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ]	139	194	266	324
Temperatura equivalente de ruido [mK/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ]	593	449	382	505
Densidad de flujo equivalente ruido [mJy/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ]	0.93	1.50	1.83	3.26

---

lidad del proceso de creación de sensores superconductores polarizados por voltaje con las características adecuadas. SPEED tiene 16 sensores de este tipo, que se leerán por medio de un multiplexor superconductor de 1 x 8, desarrollado en el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología, NIST. Aunque multiplexar no es crítico con sólo 16 detectores, se está desarrollando la infraestructura de multiplexar para futuros instrumentos de gran formato con sensores superconductores como los descritos.

En la tabla 7.2 se muestran las sensibilidades esperadas, derivadas de la teoría del ruido de bolómetros, para cada uno de los canales de SPEED. Los cálculos consideran 2 mm de vapor de agua precipitable en el sitio del GTM, y suponen un factor adicional de 0.5 en la eficiencia predicha en el modelo óptico. Aunque el sitio del GTM es un lugar seco, los bolómetros se diseñaron para operar hasta con 8 mm de vapor de agua, lo que permitirá realizar pruebas de diagnóstico en condiciones de carga alta.

SPEED estará funcionando antes que el GTM, por lo que se espera probarlo en el Telescopio Henrich Hertz ubicado en Arizona, donde permanecerá para aplicaciones científicas hasta que el GTM empiece a operar.

### **7.3. Primera generación de detectores heterodinos**

Los detectores espectroscópicos o heterodinos se usan para producir imágenes de líneas de emisión moleculares. En el caso del gas, constriñen tanto la

cinemática como las condiciones físicas y químicas. Los arreglos de plano focal, como SEQUOIA, permitirán que el GTM tome imágenes rápidas, con sensibilidad alta, en escalas grandes y a la resolución completa del telescopio.

En las siguientes secciones se resumen los tres receptores heterodinos: SEQUOIA, el buscador de corrimientos al rojo y el receptor de 1 mm. También se describe el espectrómetro genérico de banda ancha. Conjuntamente constituyen la primera generación de instrumentos espectroscópicos del GTM.

### 7.3.1. SEQUOIA

SEQUOIA es un arreglo de plano focal criogénico, diseñado para funcionar en el intervalo de 85 a 115.6 GHz. Tiene 32 pixeles con polarización doble en arreglos de 4 x 4. Dos criostatos idénticos contienen 16 pixeles cada uno. Los haces de cada uno se combinan usando una malla alámbrica.

El arreglo usa preamplificadores, que son circuitos integrados de microondas monolíticos de fosfato de indio (InP) con ganancias de 35-40 decibeles (dB), seguidos por un mezclador subarmónico que tiene una banda de frecuencia intermedia (FI) de 5 – 20 GHz. Toda la banda de señal está cubierta con la respuesta de la banda lateral, usando sólo dos osciladores locales a 40 y 60 GHz.

Los preamplificadores que usan tecnología InP fueron diseñados en UMass Amherst, mientras que la oblea para la primera etapa de amplificación y la unidad de la segunda etapa se contrataron a diferentes empresas. El ruido de banda angosta puede ser tan bajo como 27 K a 100 GHz y menor que 40 K entre 85 y 115 GHz. La figura 7.6 muestra una gráfica de ruido típico.

Tabla 7.3: Especificaciones de SEQUOIA en el GTM. [Créditos: Laboratorio de Instrumentación, FCRAO].

Número de pixeles	32 (2 de 4x4)
Tamaño del haz [seg de arco]	15
Espacio entre haces [seg de arco]	30
Polarizaciones	2
Ancho de banda RF (instantáneo)[GHz]	85-115
Ancho de banda FI (instantáneo)[GHz]	5-20
$T_{\text{sistema}}$ (de un pixel)[K]	< 60K de 85 a 105 GHz < 90K de 105 a 115 GHz
$T_{\text{sistema}}$ (en el cielo)[K]	de 100 a 250

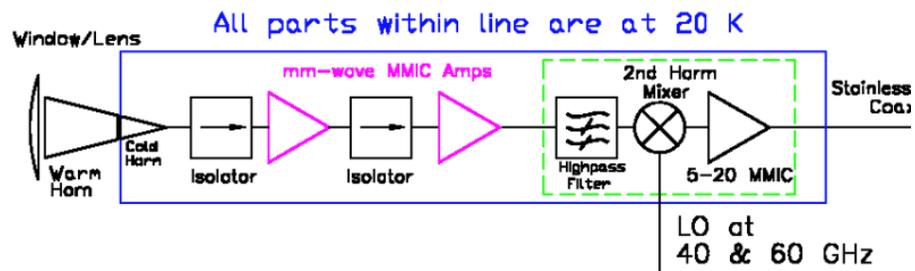


Figura 7.4: Diagrama de bloques de un pixel de SEQUOIA<sup>[4]</sup>.

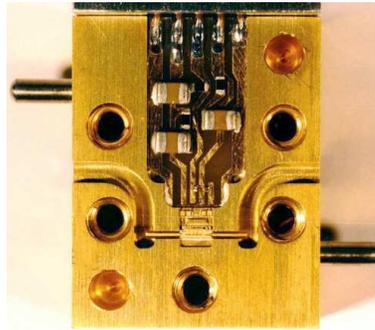


Figura 7.5: Vista de un preamplificador de SEQUOIA<sup>[4]</sup>. La escala es de 1.5 cm de izquierda a derecha.

En el arreglo se usan cornetas cuadradas ya que así se optimiza el espacio entre ellas. Cada corneta tiene 25 mm de apertura y todas las cornetas se hacen en un solo bloque. Con un par de paredes corrugadas y el otro par suave, los patrones del haz son simétricos, con dos lóbulos laterales. El extremo de la apertura está a temperatura ambiente, mientras que el extremo de la guía de onda está a 20 K. Las dos secciones están alineadas con aislantes térmicos, que reducen las cargas de calor. Este ensamble denso lleva a un espaciamiento del doble del ancho del haz a la mitad de la potencia máxima a media banda.

Cada pixel se convierte a frecuencia con un mezclador subarmónico, usando un par de diodos antiparalelos. Las frecuencias requeridas del oscilador para una cobertura completa son 40 y 60 GHz, con una potencia de 8 mW por mezclador. Hay amplificadores de potencia independientes en cada criostato, con un manejador común. La distribución del oscilador local es uno de los problemas más difíciles de resolver en los arreglos de receptores y para este receptor la frecuencia, relativamente baja, es de gran ayuda.

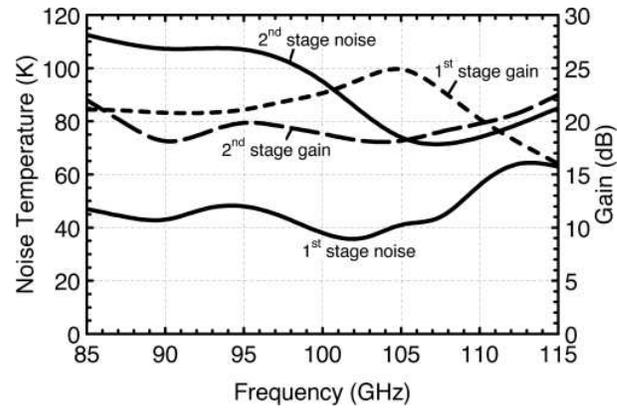


Figura 7.6: Temperatura de ruido y ganancia de los preamplificadores de la primera y segunda etapa de SEQUOIA. [Cortesía de N. Erickson, UMass Amherst/FCRAO].



Figura 7.7: Detalles del interior del criostato de SEQUOIA. La altura entre la parte inferior y la superior es de 25 cm aproximadamente.

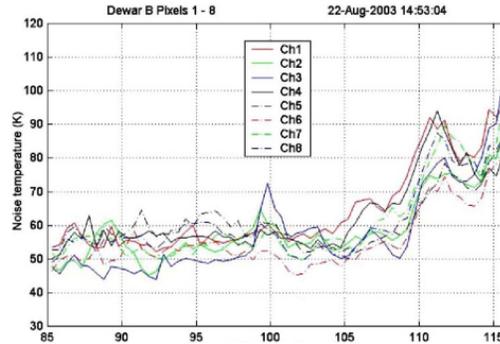


Figura 7.8: Temperatura de ruido para 8 pixeles SEQUOIA. [Cortesía de N. Erickson, UMass Amherst/FCRAO].

Cada criostato se enfría por un sólo refrigerador con 3.5 W de capacidad de enfriamiento a 18 K. Mientras que las fluctuaciones en la ganancia de la línea base son altas (0.2%), están fuertemente correlacionadas con el ancho de banda, por lo que la estabilidad de la línea base es excelente. La figura 7.8 muestra el desempeño del instrumento en términos de ruido en la banda de operación, para 8 pixeles en uno de los criostatos. Las medidas fueron obtenidas en el laboratorio. SEQUOIA ha estado funcionando en el telescopio de 14 m del FCRAO desde el 2002 y una vez que se instale en el GTM, producirá resultados inmediatos.

### 7.3.2. El buscador de corrimientos al rojo

Entre los temas más importantes de la astronomía contemporánea se encuentra el estudio del Universo temprano. Uno de los principales indicadores de su estado son las galaxias a corrimientos al rojo muy grandes. La expansión de Hubble predice una relación simple entre el corrimiento al rojo y la

distancia, y de ahí, la edad de las galaxias. El receptor que se describe a continuación se usará para identificar corrimientos al rojo.

Las líneas espectrales más intensas en las galaxias son las del CO y las del carbono atómico C y están bastante separadas en frecuencia. Cualquier búsqueda de líneas, requiere la detección de más de una para identificar, de manera unívoca, el corrimiento al rojo. Por lo tanto, un receptor diseñado para realizar este trabajo debe cubrir el mayor ancho de banda posible. Dada la tecnología y las propiedades atmosféricas, se ha elegido un ancho de banda de 75 a 111 GHz. Tal banda cae entre dos líneas de absorción atmosféricas muy fuertes, en donde la temperatura de ruido esperada aumenta rápidamente. En vista de que se espera que las líneas galácticas sean muy débiles, no hay ventaja en extender la búsqueda a frecuencias con alta absorción. Con esta elección de ancho de banda, la probabilidad de detectar una línea de una galaxia con corrimiento al rojo  $z > 1$  y dos líneas con  $z > 3.2$ , es muy alta.

El receptor se desarrolló usando las tecnologías más novedosas, como son los amplificadores de microondas monolíticos de banda ancha, del mismo tipo que los usados en SEQUOIA. Alcanzan temperaturas de ruido tan bajas como 50 K en la banda de 75 – 111 GHz, como se muestra en la figura 7.6. Con dos dispositivos de este tipo en cascada se tienen ganancias de 40 dB y el ruido de los estados subsecuentes, no es significativo.

Se han desarrollado otras mejoras importantes en las guías de onda. Para alcanzar mayor sensibilidad es ideal usar receptores con polarización doble

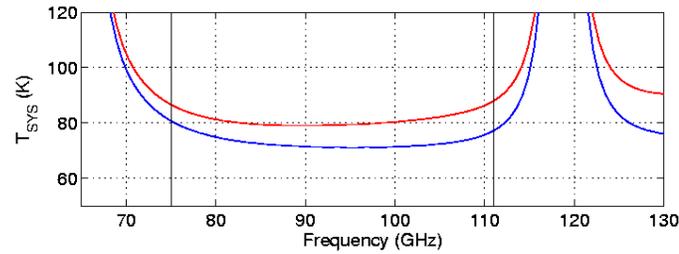


Figura 7.9: Temperatura de ruido en el cielo esperada para el buscador de corrimientos al rojo en condiciones de 2 mm (azul) y 5 mm (rojo) de vapor de agua precipitable, con una temperatura de ruido del receptor de 60 K. [Cortesía de G. Narayanan, UMass Amherst/FCRAO].

en una sola corneta. Se ha desarrollado un combinador de polarización de guía de onda con muy pocas pérdidas<sup>[5]</sup>. El intercambiador de haz, basado en un interruptor de polarización de rotación de Faraday, ha sido un desarrollo adicional. El dispositivo rota el estado de polarización de ambas entradas 90 grados, vía la aplicación de un campo magnético. Poniendo una red de alambre enfrente de la corneta, el interruptor de polarización se vuelve un intercambiador de haz, ya que intercambia los haces reflejado y transmitido.

Los receptores tendrán dos haces polarizados que son intercambiables, de tal forma que un haz permanezca en la fuente todo el tiempo. Se trata de un método más eficaz que el uso de óptica o de un interruptor mecánico. Los haces se combinan en modos de guías de onda con polarización doble y se activa la polarización mediante un interruptor eléctrico, como se muestra en la figura 7.11.

Los cuatro receptores forman un espectrómetro de autocorrelación, con

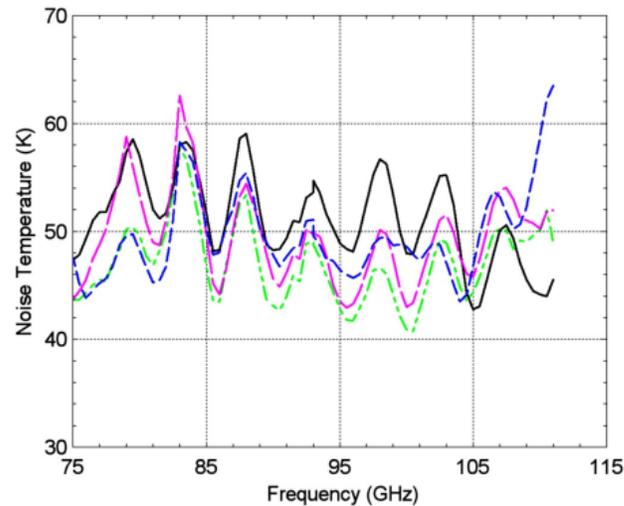


Figura 7.10: Temperatura de ruido del amplificador para 4 pixeles del buscador de corrimientos al rojo.

un ancho de banda de 144 GHz, en la frecuencia intermedia, y la banda completa necesita ser procesada espectralmente de forma simultánea. Para propósitos de búsqueda de líneas en galaxias se requiere una resolución de 30 MHz, lo que implica 5000 canales espectrales. Esto se puede lograr con un banco de filtros, pero la complejidad y el costo serían considerables. Se desarrolló una nueva técnica usando autocorrelación analógica<sup>[6]</sup> y el diseño se ha refinado para permitir un ancho de banda mucho mayor, a un costo significativamente menor. La técnica básica consiste en dividir una señal de banda ancha en dos partes, que se envían en direcciones opuestas hacia dos líneas paralelas de retraso.

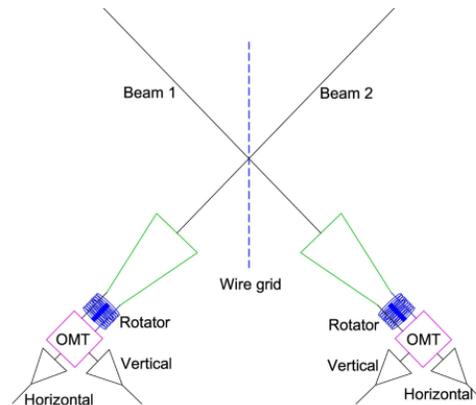


Figura 7.11: Esquema de los haces de entrada del buscador de corrimientos al rojo, mostrando el intercambiador de haz y el transductor ortomodo.

### 7.3.3. El receptor de 1 mm para las pruebas iniciales del GTM

El receptor que operará en la ventana atmosférica de 1.3 mm, correspondiente a 210 – 275 GHz, empleará detectores que están basados en tecnología superconductor-aislante-superconductor. Tendrá alta sensibilidad ya que usará un esquema de separación de bandas laterales. En cada polarización, habrá 8 GHz de ancho de banda efectivo sin el uso de sintonizadores mecánicos.

Durante la etapa de instalación y pruebas del telescopio el receptor se montará en el foco Cassegrain del GTM y empleará un transductor ortomodo basado en una guía de ondas. El diseño del sistema completo se ha optimizado para permitir que los subsistemas individuales se puedan escalar, considerando que en el futuro se pueda construir un arreglo de gran formato a 1 mm. La figura 7.12 muestra un diagrama de bloques del sistema. En la tabla

Tabla 7.4: Especificaciones del receptor de 1 mm. [Créditos: G. Narayanan, UMass Amherst/FCRAO].

---

Tamaño del haz [seg de arco]	5.5 - 7
Polarizaciones	2
$T_{\text{sistema}}$ (banda lateral única)[K]	< 140
Ancho de banda RF [GHz]	210 – 275
Ancho de banda FI (banda lateral superior e inferior) [GHz]	4 – 12
Factor de discriminación [dB]	> 20

---

7.4 se resumen las especificaciones y el desempeño esperado del receptor.

### 7.3.4. El espectrómetro de banda ancha

Los detectores heterodinos utilizarán el espectrómetro genérico del GTM. Se trata de un sistema autocorrelador digital de banda ancha, capaz de tomar hasta 64 entradas y producir espectros en diversas combinaciones del ancho de banda total y resolución en frecuencia.

El espectrómetro del GTM se acoplará a sistemas como SEQUOIA, a sistemas de un solo pixel y a futuros sistemas, como arreglos de plano focal de formato grande. Los espectrómetros de autocorrelación son una solución común cuando se requiere un sistema flexible, y de ahí la elección de un correlador versátil para el GTM.

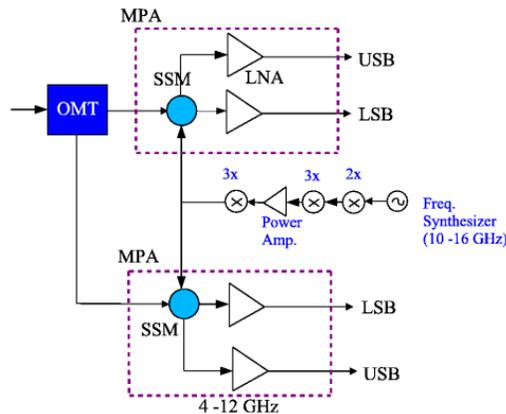


Figura 7.12: Diagrama de bloques del receptor de 1 mm. Los módulos mezcladores de los preamplificadores están encerrados por líneas púrpura. OMT: transductor ortomodo, SSM: mezclador de banda lateral, LNA: amplificador de bajo ruido. [Cortesía de G. Narayanan, UMass Amherst/FCRAO].

Un espectrómetro de autocorrelación calcula la función de autocorrelación de la señal de entrada. El espectro se obtiene de la transformada de Fourier de la función de autocorrelación. El ancho de banda está determinado por la tasa de muestreo, y la resolución por el número de retrasos. En el caso del correlador del GTM, la tasa de muestreo es de 1.6 GHz en el modo de 3 niveles. Los correladores ofrecen estabilidad y flexibilidad, pero el muestreo finito reduce la sensibilidad, y de ahí, la razón señal a ruido.

Los correladores del GTM manejarán todas las técnicas de adquisición de datos planeadas, como el intercambio de posiciones ( $< 1$  Hz), intercambio de frecuencia ( $\sim 1$  Hz), intercambio de haces ( $\sim 1$  Hz) y cartografía instantánea ( $\sim 10$  Hz). Los requerimientos de ancho de banda y resolución están determinados por los objetivos científicos que se presentan en la figura

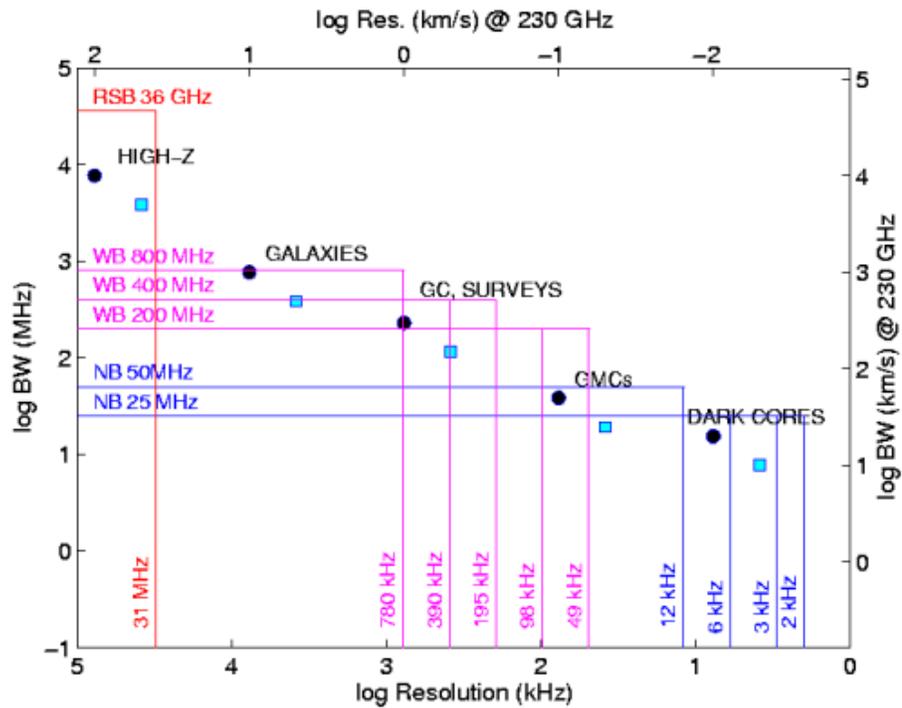


Figura 7.13: Requerimientos de ancho de banda y resolución para varios proyectos astronómicos dadas las especificaciones del sistema correlador del GTM. Los requerimientos científicos se muestran con círculos y cuadrados para 1 mm y 3 mm, respectivamente; en todos los casos éstos se satisfacen por los modos disponibles del espectrómetro. NB: modo de banda angosta; WB: modo de banda ancha, RSB: espectrómetro para el receptor de corrimientos al rojo. [Créditos: G. Narayanan y F.P. Schloerb, UMass Amherst/FCRAO].

Tabla 7.5: Modos de operación más comunes del espectrómetro de banda ancha.[Créditos: Laboratorio de Instrumentación, FCRAO]

---

Pixeles	Salidas	Ancho de banda	Canales	Resolución
	(FI/pixel)	(MHz)	(número)	(kHz)
32	1	800	1024	780
32	2	400	1024	390
32	2	200	2048	98
32	2	200	8192	24
32	2	50	16384	3

---

Tabla 7.6: Requerimientos de ancho de banda y resolución del espectrómetro para llevar a cabo los proyectos astronómicos que se indican.

Tópico	Ancho de banda km/s	Resolución km/s
Corrimientos al rojo de galaxias primigenias por descubrir	> 1000	~ 100
Imágenes extragalácticas	~ 1000	~ 10
Censos de galaxias y fuentes con velocidades altas	~ 300	~ 1
Nubes moleculares gigantes	~ 50	~ 0.1
Nubes oscuras	~ 20	~ 0.01
Búsquedas de líneas espectrales	~ 1 GHz	~1 - 0.1

7.13. Los requerimientos se resumen a continuación, donde el ancho de banda y la resolución están expresados en unidades de velocidad.

Como se desprende de la tabla, dependiendo del proyecto científico, el espectrómetro del GTM se configurará para optimizar la cobertura en ancho de banda, o la resolución espectral, o alguna combinación intermedia.

## **7.4. La segunda generación de instrumentos del GTM**

Aún cuando la construcción de la primera generación de instrumentos está en curso, los científicos e ingenieros del INAOE y de UMass Amherst ya están programando la siguiente generación de instrumentos de frontera. Una de las motivaciones ha sido el desarrollo tecnológico que está ocurriendo, tanto en el campo de los receptores heterodinos como en el de los receptores de continuo. Los nuevos instrumentos que se describen a continuación representarán una mejora sustancial en la velocidad de cartografía, en la sensibilidad y en la cobertura en frecuencia, lo que permitirá, a su vez, llevar a cabo observaciones que no podrían realizarse de otra manera.

### **7.4.1. Detectores de continuo**

Existen tres áreas donde los avances tecnológicos tendrán alto impacto. El primero será la construcción de un arreglo de bolómetros de gran formato para el plano focal. El campo de visión del GTM tiene un diámetro de 4 min de arco. Para hacer observaciones a 1.1 mm se requerirían 3600 bolómetros, que es 25 veces el número de detectores de AzTEC. La capacidad de cartografía mejoraría entre 12 y 20 veces. Tal instrumento se utilizaría en un gran número de proyectos científicos.

Un segundo tipo de cámara sería un arreglo de gran formato de bolómetros de frecuencia selectiva. Con este instrumento se podría estudiar la estructura interna de los cúmulos de galaxias, a través de observaciones del

efecto Sunyaev–Zel’dovich. Se han establecido las especificaciones para un campo de visión de 1 x 2 min de arco, con suficiente detalle para solicitar financiamiento del gobierno de Estados Unidos.

Por último, se está trabajando en uno o más instrumentos para estudiar la polarización de la emisión de polvo a longitudes de onda milimétricas. El campo de los estudios de polarización basados en bolómetros ha tenido un gran auge en los últimos años, parcialmente debido al experimento CMBPol. De ahí la importancia de tener un instrumento de esta naturaleza para dar seguimiento a los descubrimientos de dicho experimento.

#### **7.4.2. Detectores heterodinos**

El siguiente instrumento heterodino después de SEQUOIA, que funciona a longitudes de 3 mm, es un arreglo de plano focal que funcionará a 1 mm. El instrumento programado se llama OMAR, por One Millimeter Array Receiver. Se trata de un arreglo de receptores con polarización doble, para la banda de frecuencias de 210 a 275 GHz. El arreglo estará equipado con receptores superconductores de banda lateral, modelados con la tecnología desarrollada para el receptor de 1 mm, que será usado en las pruebas iniciales del GTM. En cada pixel, se tendrá un ancho de banda efectivo de 8 GHz por banda lateral, es decir, 16 GHz en total, sin el uso de sintonizadores mecánicos. La resolución angular de cada pixel será de 6 seg de arco y el arreglo cubrirá un campo de visión de 48 seg de arco. OMAR será un instrumento novedoso que definirá la frontera de los arreglos de receptores heterodinos tipo semiconductor-aislante-semiconductor.

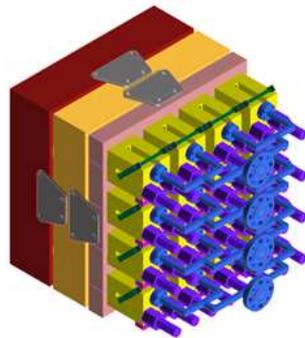


Figura 7.14: Modelo tridimensional del diseño de OMAR. Se trata de un arreglo de plano focal que funcionará a una longitud de onda de 1 mm. El ensamble completo mide aproximadamente 13 cm por lado. Se instalará dentro de un criostato y funcionará a 4 K. [Cortesía de G. Narayanan, UMass Amherst/FCRAO].

# Referencias

- [1] Glenn, J. (1998), “Bolocam: a Millimeter-wave Bolometric Camera”, Proc. SPIE, 3357, 326.
- [2] Mather, J.C. (1984), “Electrical Self-calibration of Nonideal Bolometers”, Applied Optics 23, 3181.
- [3] Wilson, G. et al. (2004), “Frequency Selective Bolometers -Progress and Projections”, en “Space Terahertz Technology”, Northampton, Massachusetts.
- [4] Erickson, N. et al. (1992), “A 15 element focal plane array for 100 GHz”, IEEE Trans, MTT, 40, 1.
- [5] Narayanan, G. y Erickson N.R. (2003), “Full-Waveguide Band Orthomode Transducer for the 3 mm and 1 mm Bands”, en “Space THz Technology”, Tucson, Arizona.
- [6] Harris, A. I. y Zmuidzinas, J. (2001), “A Wideband Lag Correlator for Heterodyne Spectroscopy of Broad Astronomical and Atmospheric Spectral Lines”, Rev. Scien. Instruments, 72, 1531.

