

# Capítulo 1

## Introducción

El Gran Telescopio Milimétrico (GTM, LMT en inglés) es un telescopio de 50 m de diámetro que operará en ondas milimétricas cortas. Será el más grande y poderoso de los telescopios de su tipo a nivel mundial. Explorará el Universo temprano para caracterizar los procesos que llevaron a la formación de las galaxias, las estrellas y los planetas que vemos hoy en día. El GTM permitirá realizar avances fundamentales en todas las áreas de la astronomía y las ciencias planetarias.

El nuevo telescopio es el proyecto científico más grande jamás realizado conjuntamente por México y Estados Unidos. Está concebido como una colaboración de igual a igual entre dos países vecinos, dirigido por dos institutos de investigación astronómica de excelencia en sus respectivos países: el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) en México, y la Universidad de Massachusetts en Amherst (UMass Amherst), Estados Unidos.



Figura 1.1: Mapa de México, con la localización del GTM/LMT. La sede del INAOE está en Tonantzintla, cerca de la ciudad de Puebla.

En la actualidad, el telescopio se encuentra en sus últimas etapas de construcción, en la cima del volcán extinto Tlitépetl, también conocido como Sierra Negra, a 4580 metros sobre el nivel del mar. El sitio del GTM está ubicado dentro del Parque Nacional Pico de Orizaba, a alrededor de 100 km al este de la ciudad de Puebla, y a aproximadamente la misma distancia del Golfo de México.

## 1.1. El INAOE y la astronomía en México

La astronomía en México es una ciencia milenaria. Para la civilización mesoamericana, la cronología era una de las motivaciones básicas para cultivar la astronomía. El deseo de crear un calendario preciso se convirtió en una obsesión, quizás todavía no igualada en la historia de los logros intelectuales humanos. Por ejemplo, para los mayas, la palabra *kin* no sólo significaba *tiempo*, sino también *día* y *Sol*. El significado y la forma de su glifo sugie-



Figura 1.2: El glifo maya *kin*, que significa *tiempo*, *día* y *Sol*.

ren que el arte de contar el tiempo estaba íntimamente relacionado con la astronomía. De acuerdo a algunos investigadores del tema<sup>[1]</sup>, las cuidadosas observaciones de la repetición cíclica de los eventos celestes produjeron un calendario más preciso que el calendario gregoriano, que se utiliza en todo el mundo hoy en día. Las culturas prehispánicas recogieron fechas en placas de piedra verticales, conocidas como estelas, así como en forma manuscrita, y muchas de las inscripciones originales se consideran verdaderas obras de arte. Para los mesoamericanos la vida en la Tierra era el reflejo del drama cósmico, y el astrónomo-sacerdote era el encargado de implantar el orden celeste en su propia sociedad. Los mayas típicamente trazaban sus ciudades siguiendo el orden celeste, erigiendo edificios magníficos para celebrar sus rituales en fechas especiales marcadas por hitos astronómicos. Estos astrónomos observaron y predijeron eclipses y posiciones planetarias, lunas llenas y nuevas, y el advenimiento de equinoccios y solsticios. El Códice de Dresden, uno de los pocos documentos prehispánicos que se conservan en la actualidad, da testimonio inequívoco de la genialidad del astrónomo-sacerdote maya. El códice incluye tablas de posiciones venusinas, lunares y eclipses, de gran precisión astronómica<sup>[1]</sup>.



Figura 1.3: El cometa de Moctezuma. El emperador contempla el cometa desde la azotea de su palacio. Cortesía de los Fondos de la Biblioteca Nacional de España. Reproducido con permiso<sup>[3]</sup>.

La enigmática civilización del México antiguo ha intrigado a muchas generaciones, y nos continúa fascinando hoy en día. De hecho, la arqueoastronomía mesoamericana es un campo de investigación activo en México y en otras partes del mundo. Como ejemplo, recientemente los frescos de Mayapán se han interpretado desde el punto de vista astronómico<sup>[2]</sup>, y se ha encontrado evidencia que sugiere que los mayas observaron al menos uno de los tránsitos de Venus en los siglos XII a XIII.

La investigación astronómica moderna en México comenzó en 1942 con la fundación del Observatorio Astrofísico de Tonantzintla, en las afueras de la ciudad de Puebla. En su tiempo, albergó una de las cámaras Schmidt más grandes del mundo, lo que llevó al descubrimiento de los objetos protoestelares Herbig-Haro, las estrellas ráfaga y las galaxias azules con líneas de emisión. En 1972, el Observatorio de Tonantzintla se transformó en el Ins-



Figura 1.4: Vista del campus del INAOE, en Tonantzintla, Puebla

tituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. El INAOE es uno de los centros de investigación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT). Se fundó con el objetivo de desarrollar, avanzar y divulgar el conocimiento científico mediante la identificación y solución de problemas científicos y la formación de especialistas en astrofísica, óptica, electrónica y ciencias computacionales. Con una planta de más de 100 investigadores y profesores en estas disciplinas, es uno de los institutos de investigación de excelencia del país.

Los principales centros de investigación astronómica de México están desplegados en la tabla 1.1. También hay grupos pequeños de astrónomos localizados en otras universidades, como las de Guadalajara y Sonora. La comunidad nacional de astrónomos profesionales incluye en la actualidad alrededor de 160 miembros, que realizan investigación en astrofísica observacional o teórica, cubriendo todo el espectro electromagnético, desde las ondas de ra-

Tabla 1.1: Principales centros de investigación astronómica en México

Institución	Acrónimo	Localización
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica	INAOE	Tonantzintla
Instituto de Astronomía Universidad Nacional Autónoma de México	IA-UNAM	Ciudad de México y Ensenada
Centro de Radioastronomía y Astrofísica Universidad Nacional Autónoma de México	CRyA	Morelia
Departamento de Astronomía Universidad de Guanajuato		Guanajuato

dio hasta los rayos gamma. Los intereses científicos de esta comunidad son diversos, y abarcan las ciencias planetarias, el medio interestelar, la formación estelar, la astronomía estelar, la dinámica galáctica, la formación y evolución de las galaxias, los núcleos activos de galaxias, la cosmología, la instrumentación astronómica, la turbulencia atmosférica y la arqueoastronomía.

Los telescopios más grandes de México, hasta la inauguración del GTM, son dos reflectores de 2.1 m de diámetro. Uno de ellos se localiza en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro, en Cananea, Sonora, y está administrado



Figura 1.5: El telescopio de 2.1 m del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro, en Cananea, Sonora.

por el INAOE. El otro, se ubica en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, Baja California, y está administrado por el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (IA-UNAM). Ambos telescopios fueron construidos con recursos nacionales principalmente, lo que implicó la formación de los primeros grupos de instrumentistas del país. Los astrónomos mexicanos también hacen uso frecuente de telescopios ópticos/infrarrojos de más grande apertura y de telescopios internacionales a bordo de satélites, tales como los localizados en el Observatorio Interamericano Cerro Tololo (CTIO)<sup>1</sup>, el Observatorio Europeo Austral (ESO), Gemini o el Telescopio Espacial Hubble (HST). El acceso a estos telescopios se reali-

---

<sup>1</sup>Se usan los acrónimos de las instituciones en el idioma original. Al final del libro se incluye una lista de acrónimos.

za mediante competencia por tiempo abierto a la comunidad internacional o mediante colaboraciones con institutos miembros. El INAOE y el IA-UNAM son además socios del telescopio de 10.4 m de diámetro Gran Telescopio Canarias (GTC) que se encuentra en construcción en España.

A finales de los 80 ya era patente que la infraestructura observacional nacional era insuficiente para abastecer las necesidades de la creciente comunidad astronómica nacional. También era evidente que la tarea de construir un telescopio de calidad mundial sólo podía ser acometida en colaboración con socios internacionales, dada la complejidad del proyecto y los recursos necesarios. Se concluyó que la mejor oportunidad estaba en las ondas milimétricas, en particular en la importante banda de 1–3 mm, que es crítica para estudiar el Universo temprano, la formación estelar y planetaria en la Vía Láctea, y la astrobiología. La propuesta de construir el GTM siguió este razonamiento de forma natural, y se consolidó alrededor de una colaboración de largo plazo entre astrónomos mexicanos y estadounidenses.

En este contexto, los investigadores y estudiantes del INAOE, que tradicionalmente han desarrollado trabajo en ondas visibles e infrarrojas, se están adaptando rápidamente al estudio de la astronomía milimétrica. Utilizan regularmente para su investigación telescopios de ondas milimétricas localizados en otros países, tales como el Observatorio Submilimétrico de Caltech (CSO), el Observatorio Radioastronómico de Arizona (ARO), el Telescopio James Clerk Maxwell (JCMT) y los telescopios del Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM). Algunos investigadores del INAOE forman parte de los equipos científicos de otros experimentos milimétricos en desarrollo,



tales como el Telescopio Submilimétrico de Gran Apertura a Bordo de un Globo (BLAST), de 2.5 m, y la antena de 6 m del Telescopio Cosmológico de Atacama (ACT).

El GTM es el proyecto científico más grande jamás realizado en México en cualquier campo del conocimiento, con un presupuesto que sobrepasa en un factor 10 al de cualquier otro gran proyecto. El desarrollo y transferencia de nuevas tecnologías al país fue uno de los requerimientos establecidos para aprobar el proyecto, lo que ha sido una prueba en sí misma para demostrar que México puede construir instrumentos científicos sofisticados. En respuesta a este desafío, los cimientos, la alidada de acero y la estructura que soporta la antena se han fabricado en México, de acuerdo a las especificaciones establecidas por la compañía que diseñó la antena, MAN Technology de Alemania. El INAOE, además, está construyendo el reflector secundario con tecnología de fibra de carbono y se ha comprometido a desarrollar instrumentación de microondas. El GTM, por lo tanto, ya ha sido un éxito al lograr incentivar el desarrollo nacional de la astronomía y la tecnología en México.

## **1.2. Astronomía en UMass Amherst**

UMass Amherst es uno de los miembros fundadores del Departamento de Astronomía de los Cinco Colegios, formado en 1960 para ligar la educación en astronomía de los estudiantes de la universidad y de los colegios de Amherst, Mount Holyoke y Smith, grupo que subsecuentemente se expandió para incluir al Colegio de Hampshire en 1970. El programa de posgrado, ahora establecido en el Departamento de Astronomía de la universidad, ofre-

ce programas de maestría y doctorado desde 1967. A través de los años, los 83 egresados del doctorado del departamento han ocupado prominentes posiciones académicas, tanto en Estados Unidos como en el extranjero, y posiciones de responsabilidad en la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), en el Observatorio Nacional de Radioastronomía (NRAO), en otros laboratorios gubernamentales y en la industria.

La investigación basada en estudios teóricos y en observaciones con telescopios espaciales y terrestres, desde el radio a los rayos-X, ha sido y sigue siendo una componente importante del programa desarrollado en UMass Amherst. Los miembros del departamento han acometido, por ejemplo, el proyecto 2MASS, que consiste en un mapa de todo el cielo a 2 micras. También han jugado un papel fundamental en el Satélite de Astronomía Submilimétrica (SWAS). Por otro lado, son usuarios frecuentes del Telescopio Espacial Hubble y del telescopio de rayos-X Chandra, y han desarrollado contribuciones fundamentales en campos de la cosmología teórica y de otras áreas de la astrofísica.

Desde su inicio, el programa observacional del departamento ha estado basado principalmente en las ondas radio. El Observatorio Radioastronómico de los Cinco Colegios (FCRAO) se fundó a unos 30 km de UMass Amherst en 1969, inicialmente para realizar estudios de pulsares en ondas milimétricas con 4 telescopios de 30 m tipo Arecibo, ligados entre sí. El descubrimiento de la emisión del monóxido de carbono en ondas milimétricas en 1970, instigó un cambio de dirección en las líneas de investigación del departamento, lo que llevó a la inauguración de la antena de 14 m en 1976, en su época el telescopio



Figura 1.6: Imagen de 2MASS del Centro Galáctico. Cortesía de 2MASS/UMass Amherst/IPAC-Caltech/NASA/NSF.

más grande de su tipo en América del Norte. Desde entonces el 14 m del FCRAO ha jugado un papel fundamental en la investigación astronómica a nivel internacional, produciendo, entre sus contribuciones más significativas, los primeros censos de nubes moleculares en la Vía Láctea y en galaxias externas, estudios pioneros sobre la química de las nubes interestelares, sobre los procesos asociados con la formación de estrellas, y sobre la química y física de los cometas.

Además del papel desarrollado en los programas de posgrado e investigación, el FCRAO ha estado en la frontera del desarrollo de nueva tecnología, requerimiento esencial para mantenerlo internacionalmente competitivo. Sus aportaciones incluyen desde receptores especiales para encontrar evidencia



Figura 1.7: El telescopio de ondas milimétricas de 14 m de diámetro del Observatorio Radioastronómico de los Cinco Colegios.

de radiación gravitatoria, lo cual meritó el premio Nobel para el estudiante de posgrado de UMass Amherst Russell Hulse y el Profesor Joseph Taylor, hasta las primeras cámaras milimétricas, los llamados arreglos de plano focal, que ahora se usan en el FCRAO y que están destinadas al GTM.

No obstante, para 1988 era evidente que aunque el telescopio de 14 m todavía desempeñaba un papel importante en la investigación astronómica, éste no tenía la misma posición competitiva que había disfrutado en el pasado, ya que para entonces se contaba con nuevos telescopios de ondas milimétricas en Europa, Estados Unidos y Japón. Dada la experiencia del grupo de FCRAO, se empezó a estudiar la posibilidad de construir un telescopio de gran apertura, todavía más grande que los hasta entonces existentes. Sin embargo, esta tarea sobrepasaba la capacidad de una sola universidad. UMass Amherst ya

había empezado a colaborar con astrónomos de México, que también estaban interesados en construir un telescopio de mayor capacidad para su país. Dicha colaboración desembocó en el Gran Telescopio Milimétrico.

### 1.3. Objetivos del proyecto GTM

El INAOE y UMass Amherst reconocen una triple responsabilidad en su misión: desarrollar investigación pionera, entrenar a las nuevas generaciones de científicos, y desarrollar tecnología para beneficio de la sociedad. Se trata de los tres objetivos claves para el proyecto GTM.

#### 1.3.1. Ciencia

La naturaleza interdisciplinaria de la astronomía implica que los nuevos descubrimientos tienen un impacto directo en muchas áreas de la ciencia, incluyendo la física, química, geología, ciencias planetarias y biología. Las razones por las que las observaciones en longitudes de ondas milimétricas son tan importantes se derivan del hecho de que una gran parte de la materia del Universo está muy fría y de que las galaxias en formación contienen un tipo de agregación de la materia a la que los astrónomos llaman *polvo* o *granos* y finalmente, esto se conjunta con que el Universo se está expandiendo.

En más detalle, una gran parte del gas interestelar y del polvo que no está siendo calentado por estrellas cercanas, se encuentra a temperaturas de 10–20 K, demasiado frías como para radiar en ondas más cortas que las bandas milimétricas y submilimétricas y, por lo tanto, tan sólo son observables

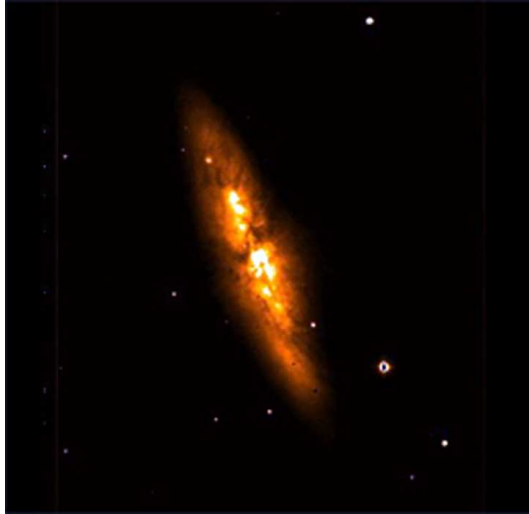


Figura 1.8: Galaxia M82, imagen tomada en la banda-*R* en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro en Sonora, administrado por el INAOE.

en estas ondas más largas. Además, el polvo de la Vía Láctea y de otras galaxias espirales está concentrado en las mismas nubes donde se forman nuevas estrellas, y el polvo oscurece las zonas internas más interesantes de estas nubes en observaciones en el visible, ultravioleta, e incluso en el infrarrojo, pero no en el milimétrico, ya que las dimensiones de los granos de polvo son más pequeñas que el milímetro.

El polvo concentrado en el plano de una galaxia espiral típica se manifiesta claramente en imágenes obtenidas en el visible como zonas de penumbra. Mucha de la radiación ultravioleta y visible emitida por las estrellas jóvenes, la absorbe el polvo, y la rerradía en el infrarrojo lejano. De hecho, las galaxias que forman estrellas masivas o que contienen núcleos activos de galaxias, que están probablemente potenciados por hoyos negros supermasivos, emiten la

mayor parte de su energía en el infrarrojo medio y lejano. Por otra parte, la expansión del Universo corre esta emisión de las galaxias distantes al intervalo milimétrico. En consecuencia, una de las áreas de investigación centrales del GTM es el Universo temprano y el origen de las estructuras de las que nacen las galaxias, las estrellas y los planetas.

La importancia del GTM en varias áreas de la astronomía está detallada en los capítulos 2 a 5 de este libro. No obstante, como suele ocurrir con todos los grandes avances en instrumentación y tecnología, los descubrimientos más significativos pueden ocurrir en áreas completamente inesperadas.

### **1.3.2. Recursos humanos**

La formación y entrenamiento de la nueva generación de astrónomos, ingenieros y técnicos, ha sido siempre una responsabilidad fundamental del INAOE y de UMass Amherst. Ambas instituciones conceden maestrías y doctorados en áreas de la ciencia y de la ingeniería.

Uno de los incentivos que ofrece el GTM a México es la oportunidad de desarrollar la infraestructura científica y tecnológica del país. Desde los inicios del proyecto, el número de estudiantes que se han formado en áreas relacionadas con el GTM en el INAOE ha crecido significativamente: no sólo astrónomos, sino también ingenieros y técnicos que han desarrollado sus trabajos en los campos de la electrónica, óptica, sistemas de control, criogenia y en otras áreas críticas para la astronomía milimétrica moderna. Un gran número de nuevos doctores y maestros está ingresando en la industria, contribuyendo de esa manera a la modernización de la base tecnológica del país.

En UMass Amherst más de la mitad de los doctorados en astronomía están basados en investigación en ondas radio y se espera que el GTM permita continuar esta tendencia. Dada la gran inversión de Estados Unidos en astronomía milimétrica, con proyectos tales como el Gran Arreglo Milimétrico de Atacama (ALMA) e instrumentos del NRAO como el Telescopio Green Bank de 100 m, es fundamental que las nuevas generaciones de estudiantes estadounidenses se sigan formando en las técnicas de la radioastronomía para que realicen investigación con estos nuevos instrumentos y se produzcan avances científicos. Cabe mencionar que, a lo largo de los años, aproximadamente la mitad del tiempo disponible en el 14 m del FCRAO ha sido utilizado por investigadores de otras universidades, incluyendo muchos candidatos a doctores. Se prevé que esta apertura a estudiantes y científicos que no son parte del proyecto GTM continúe cuando el telescopio entre en operación.

### **1.3.3. Desarrollo de nueva tecnología**

Entre los objetivos de estudio del GTM podemos mencionar la emisión proveniente de galaxias que se encuentran a miles de millones de años luz, las moléculas interestelares que tienen una abundancia de menos de una parte en mil millones, y las minúsculas agregaciones de hielo en las afueras de nuestro Sistema Solar, entre otros. Para poder observar tales componentes, además de la gran área colectora del GTM, se requiere contar con instrumentos de gran sensibilidad. Dichos instrumentos, llamados receptores y espectrómetros, no se encuentran a la venta: se deben de diseñar, desarrollar y construir en los institutos de investigación participantes.



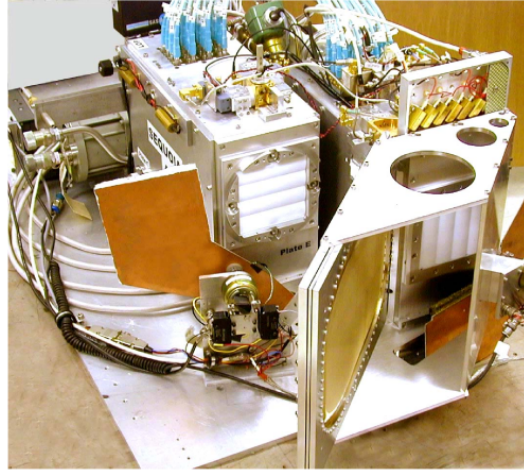


Figura 1.9: La cámara milimétrica SEQUOIA, compuesta por un arreglo de receptores de plano focal, será uno de los primeros instrumentos del GTM. Actualmente SEQUOIA se encuentra en operación en el telescopio de 14 m del FCRAO.

Por otra parte, es indispensable que el GTM pueda conservar la forma del espejo primario bajo la acción distorsionante de la gravedad y de los gradientes térmicos. Asimismo, para poder explotar la calidad de imagen ofrecida, el GTM debe de apuntar con una precisión mejor que un segundo de arco, lo que equivale al ángulo subtendido por una moneda mexicana de un peso a una distancia de 2 km, o al de una moneda estadounidense de 10 centavos a una milla. Con el objetivo de mantener la forma de esta estructura gigantesca y conservar la precisión de apuntado requerida, el GTM está dotado de una colección de sensores y un sistema de control que continuamente realizará las correcciones necesarias para ajustar la forma y orientación de la superficie de la antena.

No es sorprendente que el desarrollo tecnológico y la investigación en ingeniería que se ha empleado para construir y equipar al GTM haya tenido derramas importantes en la creación de nueva tecnología, lo que beneficia las economías de ambos países.

## **1.4. El Gran Telescopio Milimétrico**

### **1.4.1. La antena**

El GTM es un telescopio milimétrico de una sola antena, con una superficie reflectora de 50 m de diámetro. La estructura se erige a una altura equivalente a la de un edificio de 20 pisos. El GTM operará con excelente eficiencia a longitudes de onda mayores que 1 mm, y será capaz de realizar observaciones a 0.85 mm. Las especificaciones técnicas del GTM son muy exigentes, como se recoge en la tabla 1.2.

El GTM es un telescopio al aire libre, sin radomo u otra estructura que lo envuelva, para garantizar un desempeño óptimo bajo las mejores condiciones de observación, particularmente, el de las delicadas observaciones de continuo.

La precisión de la superficie fue uno de los grandes desafíos del diseño. El GTM será mejor que otros telescopios de su clase en este aspecto, al contar con una superficie activa compuesta por 180 segmentos móviles. Cada segmento se apoya en una estructura rígida de reacción, la cual se sujeta a la estructura del reflector a través de un armazón o submarco posterior. La

Tabla 1.2: Especificaciones técnicas del GTM

Propiedad	Especificaciones	Objetivo
Precisión del área efectiva	75 $\mu\text{m}$ rms	70 $\mu\text{m}$ rms
Precisión de apuntado	1.0 seg de arco	0.6 seg de arco
Eficiencia de apertura (3 mm)	0.65	0.70
Eficiencia de apertura (1.2 mm)	0.40	0.45
Sensibilidad (3 mm)	2.2 Jy/K	2.0 Jy/K
Sensibilidad (1.2 mm)	3.5 Jy/K	3.1 Jy/K
Tamaño del haz*(3 mm)	15 seg de arco	
Tamaño del haz* (1.2 mm)	6 seg de arco	

---

\* Se considera el ancho a la mitad de la altura máxima

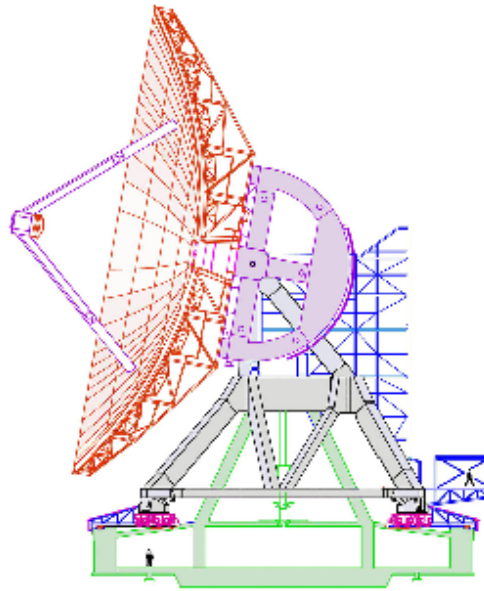


Figura 1.10: Diagrama esquemático del GTM

posición de cada submarco con respecto a la estructura de soporte se puede ajustar mediante cuatro actuadores, y así se espera corregir las deformaciones producidas por la gravedad o los gradientes térmicos. Los sensores de temperatura, colocados sobre todas las partes relevantes de la estructura, enviarán sus datos al sistema de control, y la superficie se medirá periódicamente con técnicas holográficas. Las simulaciones realizadas durante el diseño de la antena indican que será posible mantener la precisión de su superficie en presencia de vientos de hasta 10 m/s, cumpliendo así con las especificaciones técnicas.

La antena está diseñada para satisfacer los requerimientos básicos de apuntado en condiciones benignas: sin cargas de viento y con temperatu-

ras nocturnas estables. Las cargas eólicas y térmicas introducen errores de apuntado que deben ser detectados y compensados. El sistema inicial se basará en técnicas estándar, tales como el modelo de apuntado de la antena, la estabilización térmica de la estructura, y un cuidado extremo en el diseño de los controladores de movimiento de la antena. Dichos principios básicos se complementarán con las medidas de inclinómetros montados cerca del eje de elevación. Adicionalmente, los sensores de temperatura se utilizarán en conjunción con modelos de elementos finitos para determinar deformaciones estructurales, tales como las desviaciones del perfil del espejo primario o la deslocalización del subreflector con respecto a la parábola de mejor ajuste. Una vez conocidas las deformaciones estructurales, éstas se corregirán para que las propiedades de apuntado correspondan al objetivo final de desempeño de la antena.

### **1.4.2. El sitio**

El GTM se encuentra a una altitud de 4580 metros sobre el nivel del mar (msnm), en la cima del Tliltépetl, también llamado Volcán Sierra Negra, un volcán extinto, en el Estado de Puebla, a sólo 7 km del Citlaltépetl o Pico de Orizaba, el pico más alto de México. El sitio está relativamente cerca del INAOE, con un tiempo total de viaje por carretera de 2 horas. La localización del Tliltépetl a  $19^\circ$  de latitud es un aspecto atractivo del sitio, ya que el GTM será capaz de estudiar importantes fuentes del cielo austral, tales como el Centro Galáctico, que pasa por el meridiano a una elevación de  $45^\circ$ .



Figura 1.11: El Tliltépetl, también conocido como Volcán Sierra Negra, se localiza a 4580 m sobre el nivel del mar. Al fondo se ve el Citlaltépetl, el pico más alto de México (5747 msnm).

El Tliltépetl fue seleccionado por sus excelentes propiedades radiométricas de entre una lista de picos elevados de México, que eran potenciales emplazamientos para el GTM. La opacidad atmosférica, medida a 225 GHz por un radiómetro, es baja, con una mediana correspondiente a 2 mm de vapor de agua precipitable durante aproximadamente 9 meses al año.

Las condiciones meteorológicas son moderadas para la gran elevación del sitio: las nevadas son generalmente ligeras a lo largo del año, el ciclo de temperaturas diurnas es de aproximadamente 2 °C, y la temperatura media varía entre estaciones por sólo unos 5 °C. El factor más crítico para la antena es la velocidad del viento, ya que éste puede distorsionar la forma del primario y afectar al apuntado. El primer, segundo y tercer cuartil de la distribución de la velocidad del viento son 2.2, 4.0 y 5.8 m/s, respectivamente. El telescopio ha sido diseñado con el objetivo de que se apegue a las especificaciones

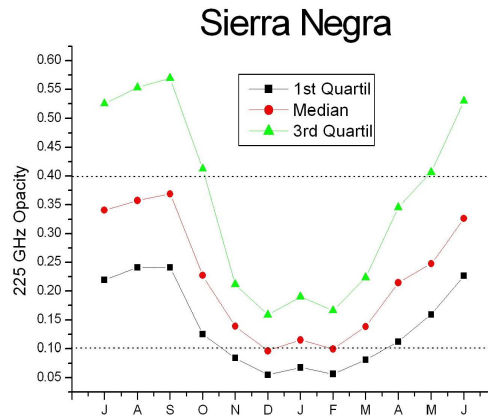


Figura 1.12: Opacidad a 225 GHz en el Tiltépetl. La escala horizontal indica el mes del año, desde julio (J) a junio (J). Como opacidad, se representa la mediana, el primer cuartil, y el tercer cuartil de la distribución de medidas tomadas por el radiómetro del GTM<sup>[4]</sup>.

técnicas a menos de 10 m/s, lo que ocurre el 90 % del tiempo<sup>[5]</sup>.

A pesar de todas estas precauciones, la operación de un telescopio como el GTM en un sitio de tanta elevación no es trivial. Los edificios del GTM contarán con enriquecimiento de oxígeno en salones vitales, y se desarrollarán vías de observación remota para que los astrónomos visitantes utilicen el telescopio desde una altitud más benigna.

### 1.4.3. Instrumentación

La instrumentación inicial ha sido seleccionada por un grupo científico compuesto por integrantes del INAOE y UMass Amherst con el fin de explotar al máximo las características especiales de una antena tan grande,

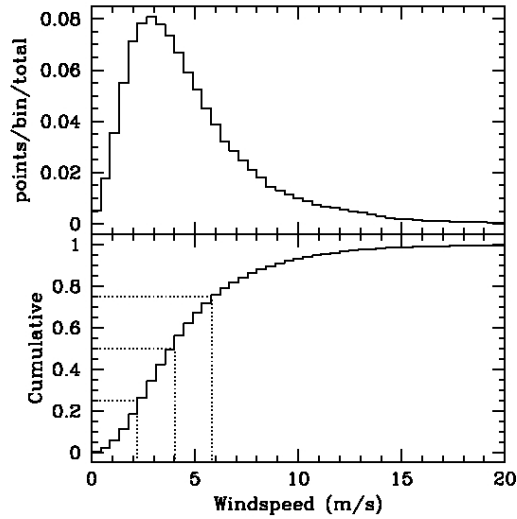


Figura 1.13: Velocidad del viento en el Tiltépetl, caracterizada con datos tomados entre octubre del 2000 y agosto del 2003. Se representan las distribuciones diferenciales y acumuladas de las medidas tomadas<sup>[5]</sup>.

así como de atender asuntos prácticos tales como probar y operar el telescopio. Tanto en el INAOE como en UMass Amherst se seguirá generando nueva instrumentación para mantener al GTM en la frontera de la investigación en los años venideros.

Con casi 2000 m<sup>2</sup> de superficie colectora y una excelente precisión en la forma de la superficie, la sensibilidad del GTM excederá la de otros telescopios milimétricos por un gran margen. Una de las ventajas de los telescopios de una sola antena, sobre los interferómetros de antenas múltiples, es que pueden utilizar bolómetros, detectores incoherentes de banda ancha, para realizar observaciones de continuo de alta sensibilidad.





Figura 1.14: El criostato y la electrónica de lectura de AzTEC en el Laboratorio de Aparatos Criogénicos de UMass Amherst.

El proyecto GTM está colaborando con un grupo internacional en la construcción de un arreglo bolométrico. Se trata de una cámara de emisión térmica llamada AzTEC. Es la segunda generación del instrumento Bolocam, que ya se está utilizando en el telescopio de 10 m de CSO. AzTEC se compone de 144 elementos de imagen o pixeles y está diseñado para operar en las bandas de 2.1, 1.4 y 1.1 mm. Será el instrumento principal encargado de identificar nuevas galaxias en formación en el Universo temprano, de realizar estudios de astroquímica del polvo contenido en galaxias, además de identificar núcleos protoestelares en nubes moleculares, y seguir los asteroides y cometas del Sistema Solar.

El otro instrumento de continuo que medirá la distribución espectral de energía es SPEED. Realizará observaciones simultáneas en cuatro bandas, 2.1, 1.3, 1.1 y 0.85 mm, utilizando la nueva tecnología de bolómetros de

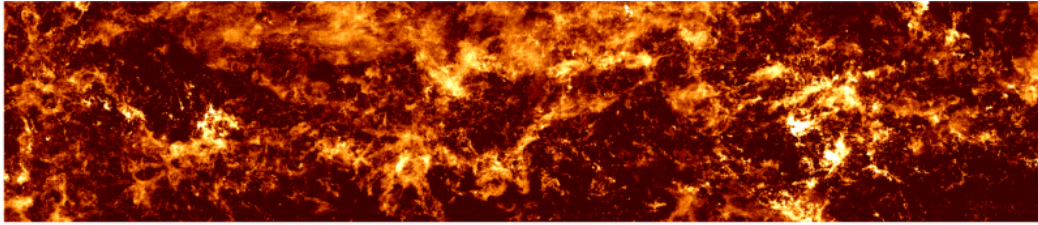


Figura 1.15: Porción de 330 grados cuadrados del exterior de la Vía Láctea, cartografiada con una cámara que precedió al SEQUOIA actual<sup>[6]</sup>. La imagen muestra la emisión del monóxido de carbono (CO), uno de los trazadores del gas molecular utilizado habitualmente.

frecuencia selectiva. Las distribuciones espectrales de energía trazadas por SPEED permitirán, por ejemplo, localizar y estudiar cúmulos distantes de galaxias mediante las distorsiones que éstos imprimen en el fondo de radiación cósmica de microondas, y constreñir la temperatura del polvo de las atmósferas cometarias y de las nubes moleculares de nuestra galaxia, así como de otras galaxias.

Para hacer espectroscopía entre 85 y 115.6 GHz se desarrolló SEQUOIA, un arreglo de plano focal heterodino de 32 píxeles. Lleva asociado un espectrómetro autocorrelador digital. El arreglo representa un gran avance respecto a receptores milimétricos anteriores, ya que utiliza los amplificadores de más bajo ruido jamás construidos en estas frecuencias: son circuitos integrados monolíticos de microondas de fosfato de indio, diseñados en UMass Amherst, con un ruido de banda tan bajo como 30 K a 103 GHz. SEQUOIA ya ha producido resultados de gran calidad, como el mapa más extenso del contenido de gas de nuestra galaxia. Sin duda, jugará un papel vital en la caracterización de la física y química del material interestelar de la Vía Láctea

y de otras galaxias. SEQUOIA se está utilizando en la actualidad en el 14 m del FCRAO, y se instalará en el GTM en cuanto empiece a operar.

El buscador de corrimientos al rojo es el instrumento que medirá el desplazamiento de las líneas espectrales de las galaxias del Universo temprano para determinar la distancia de estos objetos y sus propiedades intrínsecas. Está formado por un receptor que funcionará a 3 mm y un espectrómetro autocorrelador analógico con un amplio intervalo dinámico. El espectrómetro, de banda ultra-ancha, pasará rápidamente de una posición a otra del cielo, con alimentadores de doble polarización que cubren simultáneamente el intervalo de 75 a 111 GHz con una resolución espectral de 30 MHz.

Las primeras pruebas de la antena y la adquisición inicial de datos científicos se realizarán con un receptor optimizado a 1 mm. Se trata de un receptor mezclador de doble polarización, que empleará detectores basados en tecnología superconductor–aislante–superconductor, en un esquema de bandas laterales. Operará en la banda de 210–275 GHz, que cubre la ventana atmosférica de 1.3 mm. A largo plazo se planea construir un arreglo de plano focal de frontera, que realice espectroscopía a 1 mm, tomando este receptor como modelo.

#### **1.4.4. Interferometría de base muy larga con el GTM**

El Interferómetro de Base muy Larga (VLBI) tiene resoluciones angulares menores que un milisegundo de arco y, por lo tanto, permite realizar estudios de los fenómenos astrofísicos energéticos que se desarrollan en las escalas más pequeñas. El VLBI logra lo anterior mediante la correlación de las señales

recogidas por antenas que se encuentran a grandes distancias entre sí, y utiliza estas señales para sintetizar un telescopio cuya apertura efectiva iguala la separación entre las antenas. Debido a su extrema calidad de imagen, la técnica VLBI ha hecho grandes contribuciones a la astrofísica, incluyendo, el descubrimiento de los movimientos superluminares y los chorros relativistas de núcleos activos de galaxias; la mejor evidencia de la existencia de hoyos negros supermasivos en los centros de las galaxias; las primeras películas de la explosión de una supernova; el estudio detallado de la formación estelar en galaxias en coalescencia, mediante la observación directa de radiosupernovas; y las películas de alta resolución de la emisión de máseres en los entornos circunestelares de estrellas evolucionadas y de protoestrellas.

El VLBI será transformado en los próximos años, lo que mejorará muchísimo sus capacidades de exploración de una gran variedad de fenómenos astrofísicos con aún mejor resolución angular. El avance se debe a dos factores. El primero es la disponibilidad de nuevos telescopios milimétricos y submilimétricos, que incrementarán el área colectora del VLBI entre 86 y 230 GHz. Entre estos nuevos telescopios, el principal contribuyente es el GTM. El arreglo comprendido por el Arreglo de Base muy Larga (VLBA) y el GTM será capaz de duplicar a 86 GHz la sensibilidad de la configuración actual del VLBA. A 230 GHz la diferencia es incluso más dramática, ya que el GTM será capaz de triplicar la sensibilidad de la configuración VLBI. El segundo factor que mejorará la sensibilidad del VLBI es la nueva generación de sistemas de grabado de datos, que incrementará el ancho de banda por un factor 16 antes de que el GTM vea la primera luz. Conjuntamente, los avances antes mencionados se traducen en mejoras a frecuencias altas de un

orden de magnitud en sensibilidad, con resoluciones angulares de entre 35 y 70 microsegundos de arco. Esta nueva capacidad permitirá grandes avances científicos en varias áreas.

El correlador del VLBI no está incluido en los planes iniciales de instrumentación del GTM, pero se prevé entrar en una colaboración para tener acceso a uno de ellos.

## **1.5. Relación con otros telescopios milimétricos**

Las resoluciones del GTM, de 4.2 a 14.8 segundos de arco entre 0.85 y 3 mm, son un factor 3 a 5 mejor que las ofrecidas a las mismas frecuencias por telescopios tales como el 10 m de CSO, el 15 m JCMT o el 30 m del IRAM, y esto es suficiente para resolver el fondo de radiación extragaláctico en fuentes discretas. En contraste, las imágenes más profundas realizadas por telescopios de esta clase hasta el momento son confusas, y sólo pueden resolver el 20–50% de las fuentes que crean la emisión conjunta del fondo extragaláctico milimétrico. Puesto que menos del 0.01% del cielo ha sido cartografiado y resuelto en ondas milimétricas, el GTM tendrá que censar grandes regiones del cielo para caracterizar las propiedades típicas de la población milimétrica extragaláctica. La gran apertura del GTM, acoplada a sus sensibles cámaras de imagen, produce una velocidad de cartografía unas 100 veces más rápida que la de otros telescopios.

El GTM ofrece un complemento natural a la nueva generación de inter-

Tabla 1.3: Desempeño de diferentes telescopios (sub-)milimétricos, normalizado a los valores del GTM. En todos los casos, los valores más pequeños indican un mejor desempeño. Se consideran las mismas temperaturas de sistema para todos los instrumentos, a las longitudes de onda indicadas. GBT: una sola antena de 100 m; CARMA: seis antenas de 10.4 m y diez antenas de 6.1 m; ALMA: 64 antenas de 12 m. [Cortesía de G. Narayanan, UMass Amherst/FCRAO].

	GBT	CARMA	GTM	ALMA	ALMA
Año de entrada en operación	2006	2006	2008	2008	2012
Sensibilidad en flujo					
Línea (3 mm)	0.6	2.5	1.0	1.1	0.3
Continuo (1 mm)	X	19	1.0	2.9	0.7
Sensibilidad en brillo superficial					
Línea (3 mm)	2.3	3.3	1.0	3.3	2.5
Continuo (1 mm)	X	25	1.0	8.8	6.6
Tiempo de cartografía para fuentes puntuales					
Línea (3 mm)	15	4.5	1.0	1.1	0.1
Continuo (1 mm)	X	1100	1.0	34	2.2
Tiempo de cartografía para fuentes extensas					
Línea (3 mm)	350	7.7	1.0	10	5.8
Continuo (1 mm)	X	1900	1.0	320	180

ferómetros (sub)milimétricos, tales como el Arreglo Milimétrico de Atacama (ALMA) o el Arreglo Combinado para Investigación Milimétrica (CARMA). La extensa cartografía que desarrollará el GTM permitirá poner en contexto los mapas interferométricos de mayor resolución, y proporcionará la emisión de espaciado nulo, que resulta demasiado extendida para ser detectada en los mapas interferométricos.





# Referencias

- [1] Aveni, A.F. (1980), “Skywatchers from Ancient Mexico”, University of Texas Press.
- [2] Galindo, J. y Allen, Ch. (2004), “Maya observations of the 13th century transit of Venus?”, Memorias del Coloquio de la UAI num. 196, Kurtz, D.W. y Bromage, G.E. eds., Cambridge Univ. Press.
- [3] Durán, F.D. (1579), “Historia de las Indias de Nueva España e Islas de Tierra Firme”.
- [4] Meza, J. et al. (2003), “Mediciones de opacidad atmosférica en el Volcán Sierra Negra”, Reporte Técnico GTM/LMT.
- [5] Carrasco, E. et al. (2003), “Weather Conditions at Sierra Negra Site”, Reporte Técnico INAOE, RTO548.
- [6] Heyer, M. et al. (1998), “The Five College Radio Astronomy Observatory CO Survey of the Outer Galaxy”, *Astrophys. J. Suppl.*, 115, 241.

