



Imagen de 2MASS del Centro Galáctico
[2MASS/University of Massachusetts Amherst/
IPAC-Caltech/NASA/NSF]

Esperanza Carrasco • Itziar Aretxaga • William M. Irvine
(coordinadores)

EL GRAN TELESCOPIO MILIMÉTRICO

Dos países vecinos exploran juntos el cosmos



INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFÍSICA, ÓPTICA Y ELECTRÓNICA
UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS AMHERST

MÉXICO



Miembros de los grupos de trabajo del Observatorio del Gran Telescopio Milimétrico, durante un taller en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en Tonantzintla, México, en 2002. De arriba abajo, y de izquierda a derecha: Daniella Malin, Kamal Souccar, Gary Wallace, Edward L. Chapin, Luis Carrasco, Alfonso Serrano, David H. Hughes, William F. Wall, Ronald L. Snell, James Lowenthal, Itziar Aretxaga, Alberto Carramiñana, Celso Gutiérrez, Min S. Yun, Omar López-Cruz, Mark Heyer, F. Peter Schloerb, William M. Irvine, Pablo S. Barrera, Rogerio Enríquez, Ronna Erickson, Judith Young y Read Predmore.

AUTORES

INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFÍSICA, ÓPTICA Y ELECTRÓNICA

Itziar Aretxaga
Pablo S. Barrera
Alberto Carramiñana
Esperanza Carrasco
David M. Gale
David H. Hughes
Janina Nava
Alfonso Serrano
William F. Wall

UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS AMHERST
FIVE COLLEGE RADIO ASTRONOMY OBSERVATORY

Neal Erickson
Mark Heyer
William M. Irvine
Gopal Narayanan
F. Peter Schloerb
Ronald L. Snell
Kamal Souccar
Grant Wilson
Judith Young
Min S. Yun

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY
HAYSTACK OBSERVATORY

Sheperd Doleman

SMITH COLLEGE ASTRONOMY DEPARTMENT

James Lowenthal

MECHANICAL ENGINEERING RESEARCH LABORATORY, DECATUR, GEORGIA

David R. Smith

Primera edición: 2006

Edición no venal

D.R. ©, 2006, INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFÍSICA, ÓPTICA Y ELECTRÓNICA
Luis Enrique Erro 1, 72840 Tonantzintla, Puebla

ISBN 968-9085-00-X

Impreso en México • *Printed in Mexico*

Índice general

| | |
|---|----|
| AGRADECIMIENTOS | 11 |
| PRESENTACIÓN | 13 |
| PRÓLOGO | 15 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 19 |
| 1.1 El Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica y la astro- nomía en México | 20 |
| 1.2 La astronomía en la University of Massachusetts Amherst | 25 |
| 1.3 Objetivos del proyecto GTM | 27 |
| 1.3.1 Ciencia | 27 |
| 1.3.2 Recursos humanos | 29 |
| 1.3.3 Desarrollo de nueva tecnología | 29 |
| 1.4 El Gran Telescopio Milimétrico | 31 |
| 1.4.1 La antena | 31 |
| 1.5 El sitio | 33 |
| 1.6 Instrumentación | 36 |
| 1.7 Interferometría de base muy larga con el GTM | 39 |
| 1.8 Relación con otros telescopios milimétricos | 40 |
| Referencias | 40 |
| 2. LA COSMOLOGÍA Y EL ORIGEN Y LA EVOLUCIÓN DE LAS GALAXIAS | 43 |
| 2.1 Introducción | 43 |
| 2.2 Historia de la formación estelar ópticamente oscurecida | 44 |
| 2.2.1 Censos cosmológicos | 45 |

| | |
|---|----|
| 2.2.2 Resolución del fondo de radiación del infrarrojo lejano al milimétrico | 48 |
| 2.2.3 Medida de la distribución de corrimientos al rojo de galaxias oscuras | 50 |
| 2.3 Núcleos activos de galaxias a alto corrimiento al rojo | 51 |
| 2.3.1 Censos de la emisión de continuo y la emisión molecular | 52 |
| 2.3.2 El entorno de los núcleos activos de galaxias en ondas milimétricas | 55 |
| 2.4 Detección de las anisotropías del fondo de radiación cósmica de microondas | 56 |
| 2.4.1 Fluctuaciones primordiales del fondo de radiación cósmica | 58 |
| 2.4.2 Fluctuaciones secundarias del fondo de radiación cósmica debidas al efecto Sunyaev-Zel'dovich | 59 |
| 2.5 Estallidos de rayos gamma | 60 |
| Referencias | 63 |
| 3. LAS GALAXIAS DEL UNIVERSO LOCAL | 67 |
| 3.1 Introducción | 67 |
| 3.2 Distribución del gas molecular | 67 |
| 3.3 Inestabilidades y formación estelar | 70 |
| 3.4 Exploración de las condiciones físicas del medio interestelar | 72 |
| 3.5 Cartografía de galaxias cercanas | 73 |
| 3.6 Exploración de la Galaxia con la técnica de interferometría de base muy larga | 77 |
| 3.6.1 Cartografía del horizonte de sucesos de un hoyo negro | 77 |
| 3.6.2 Aceleradores cósmicos: mecanismos de emisión y colimación de los chorros relativistas | 80 |
| Referencias | 81 |
| 4. FORMACIÓN ESTELAR Y MEDIO INTERESTELAR EN LA VÍA LÁCTEA | 83 |
| 4.1 Introducción | 83 |
| 4.2 Procesos de formación estelar | 83 |
| 4.3 Astroquímica | 87 |
| 4.4 Pérdida de masa estelar | 89 |
| Referencias | 90 |

| | |
|---|-----|
| 5. LAS CIENCIAS PLANETARIAS Y LA ASTROBIOLOGÍA | 91 |
| 5.1 Introducción | 91 |
| 5.2 Cuerpos pequeños | 91 |
| 5.2.1 Cometas | 92 |
| 5.2.2 Asteroides, centauros y objetos del Cinturón de Kuiper | 95 |
| 5.3 Atmósferas planetarias y satelitales | 97 |
| 5.4 Planetas extrasolares y discos protoplanetarios | 99 |
| 5.5 Astrobiología | 101 |
| 5.6 Astronomía de radar | 102 |
| Referencias | 103 |
| 6. DESARROLLO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS | 105 |
| 6.1 Introducción | 105 |
| 6.2 Superficie activa | 106 |
| 6.2.1 Corrección de errores debidos a efectos gravitacionales | 106 |
| 6.2.2 Corrección de errores inducidos térmicamente | 109 |
| 6.2.3 Corrección de errores debidos al viento | 110 |
| 6.3 Apuntado del telescopio | 110 |
| 6.4 El sistema de control y seguimiento | 112 |
| 6.4.1 Enfoque general | 112 |
| 6.4.2 Diseño orientado a objetos y automatización | 112 |
| 6.4.3 Sistema de estados globales | 114 |
| 6.4.4 Sistema de control y seguimiento del GTM | 115 |
| 6.4.5 Adaptación a telescopios existentes | 118 |
| 6.5 La máquina de medición por coordenadas | 118 |
| 6.6 Desarrollo de instrumentos | 121 |
| Referencias | 121 |
| 7. INSTRUMENTOS CIENTÍFICOS | 123 |
| 7.1 Introducción | 123 |
| 7.2 Primera generación de cámaras del continuo | 124 |
| 7.2.1 AZTEC | 124 |
| 7.2.2 SPEED | 127 |
| 7.3 Primera generación de detectores heterodinos | 130 |
| 7.3.1 SEQUOIA | 130 |
| 7.3.2 El buscador de corrimientos al rojo | 134 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 7.3.3 | El receptor de 1 mm para las pruebas iniciales del GTM | 136 |
| 7.3.4 | El espectrómetro de banda ancha | 138 |
| 7.4 | La segunda generación de instrumentos del GTM | 140 |
| 7.4.1 | Detectores de continuo | 140 |
| 7.4.2 | Detectores heterodinos | 141 |
| | Referencias | 142 |
| 8. | DESARROLLO DE RECURSOS HUMANOS | 143 |
| 8.1 | Introducción | 143 |
| 8.2 | El Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica | 143 |
| 8.3 | La University of Massachusetts Amherst | 146 |
| 9. | EL GRAN TELESCOPIO MILIMÉTRICO Y SU RELACIÓN CON LA SOCIEDAD . . | 149 |
| 9.1 | El Parque Nacional Pico de Orizaba | 150 |
| 9.2 | El GTM y las comunidades aledañas | 157 |
| 9.3 | El GTM y el público amplio | 159 |
| | Referencias | 162 |
| 10. | EL OBSERVATORIO DEL GRAN TELESCOPIO MILIMÉTRICO | 163 |
| 10.1 | Introducción | 163 |
| 10.2 | Infraestructura | 164 |
| 10.3 | Operación | 167 |
| 10.4 | Oportunidades de participación para la comunidad astronómica . . | 167 |
| | GLOSARIO | 169 |

Agradecimientos

EL GRAN TELESCOPIO MILIMÉTRICO es un proyecto financiado con recursos públicos de México y de Estados Unidos. Nuestro profundo reconocimiento a las instituciones gubernamentales de los dos países que han hecho posible la construcción del telescopio.

En el caso de México quisiéramos mencionar el apoyo decidido del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. De manera singular valoramos el interés permanente de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público y de la Secretaría de la Función Pública. Agradecemos igualmente la participación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. La labor diplomática de la Secretaría de Relaciones Exteriores y de la Embajada de Estados Unidos en México ha sido fundamental en la activa promoción de la relación científica binacional.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, por medio del Instituto Nacional de Ecología y de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, ha coadyuvado a que el proyecto cumpla sus responsabilidades de la mejor manera posible. Gracias por la confianza y por la oportunidad que nos han brindado de contribuir al desarrollo del Parque Nacional Pico de Orizaba. Asimismo valoramos el interés de algunos investigadores del Colegio de Posgraduados de Chapingo y del Department of Natural Resources Conservation de la University of Massachusetts Amherst en el parque nacional.

Reconocemos la participación crucial del gobierno del Estado de Puebla, en especial de la Secretaría de Gobernación y de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, así como la de los municipios cercanos al sitio donde está ubicado el telescopio.

Invaluable es el trabajo que las autoridades del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica y de la University of Massachusetts Amherst han desarrollado para la realización del proyecto. Nuestra gratitud por la confianza y el apoyo permanentes.

Reconociendo el compromiso que el proyecto del Gran Telescopio Milimétrico tiene con la sociedad, las dos instituciones copartícipes decidieron publicar un libro para difundir los objetivos y el alcance del proyecto. La versión en inglés, coordinada por el mismo grupo de trabajo, se publicó en Estados Unidos en septiembre de 2005. Dicha versión, originalmente traducida por Esperanza Carrasco e Itziar Aretxaga, se enriqueció con sugerencias y comentarios que se introdujeron en esta versión en español.

El proyecto ha tenido la fortuna de contar con el interés de destacados intelectuales y artistas. Valoramos el generoso apoyo del pintor José Villalobos, quien creó y donó el grabado *Solsticio*, especialmente para la portada. Asimismo apreciamos la solidaridad de Axel Retif y su profesional labor en la formación del libro como una aportación personal al proyecto.

Gracias a los colegas que proporcionaron fotografías y a Sergio Bourguet por el diseño de la portada. Especial mención merece Jorge Reyes, por su bien logrado trabajo con las gráficas e imágenes. Por último, reconocemos la gentileza, el cuidado y la paciencia de Antonio Bolívar durante el proceso de edición.

ESPERANZA CARRASCO

ITZIAR ARETXAGA

WILLIAM M. IRVINE

Presentación

MES MUY GRATO presentar este libro sobre el Gran Telescopio Milimétrico, proyecto binacional entre México y Estados Unidos, encabezado por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica y por la University of Massachusetts Amherst. Se trata del mayor proyecto científico emprendido por México en su historia, y de cooperación entre los dos países. Será el telescopio más grande del mundo en su tipo y permitirá observar el Universo frío con una profundidad sin precedentes.

El proyecto abarca diferentes aspectos que van desde la investigación científica pura, el desarrollo de nuevas tecnologías, la formación de recursos humanos de alto nivel y la divulgación del conocimiento hasta la construcción de un camino de acceso, la relación con las comunidades aledañas al sitio donde está ubicado el telescopio y el impacto ambiental que tiene dentro de un parque nacional. El proyecto ha cumplido cabalmente todas las tareas que los diversos aspectos del mismo exigen.

La construcción del telescopio ha representado un hito en el desarrollo tecnológico del país ya que las empresas mexicanas y centros de investigación participantes han desarrollado nuevas tecnologías para alcanzar las especificaciones técnicas. A lo largo del proyecto ha participado un gran número de científicos y de especialistas en diversas áreas no sólo formando estudiantes sino también aportando su experiencia y entusiasmo al ambiente académico y cultural de las instituciones participantes.

La colaboración con nuestros colegas de la University of Massachusetts Amherst ha pasado por un proceso de aprendizaje, de conocimiento y reconocimiento de las diferencias culturales, diferencias que en la mayoría de los casos se han traducido

en aportaciones valiosas al proyecto. A lo largo de los años se han establecido vínculos profesionales y personales sólidos que han permitido que el proyecto avance como una verdadera colaboración entre pares, trabajando por un objetivo común.

El Gran Telescopio Milimétrico brindará a las dos instituciones copartícipes, y en el caso de México a la comunidad astronómica nacional, la oportunidad de liderar la investigación mundial en ondas milimétricas. Asimismo, muestra en México la viabilidad de llevar a cabo proyectos científico-tecnológicos de frontera indispensables para mantener el país en un nivel competitivo en el ámbito internacional.

ALFONSO SERRANO PÉREZ-GROVAS

*Director del Observatorio
del Gran Telescopio Milimétrico*

Prólogo

EL GRAN TELESCOPIO MILIMÉTRICO (GTM) es un proyecto para la construcción y operación de una antena de 50 m de diámetro, con receptores extremadamente sensibles y sistemas de mando, control y procesamiento de datos. Se trata del telescopio más grande del mundo que opera en ondas milimétricas. Es un instrumento único porque su gran área colectora, de casi 2 000 m², se traduce en una alta sensibilidad y una velocidad de cartografía cósmica nunca antes alcanzadas. El telescopio se encuentra en la cima del volcán Sierra Negra o Tliltépetl, a 4 580 m de altitud, en la región central de México.

El GTM permitirá realizar medidas detalladas de la estructura del fondo de radiación cósmica y descubrir cientos de miles de nuevas galaxias, tal como eran en la época en que se formaron, lo que contribuirá a comprender la naturaleza, el origen y la evolución del Universo y sus estructuras. También hará posible la observación a través del polvo que oscurece el proceso de formación estelar. Asimismo, podrá analizar el medio ambiente de los núcleos activos de galaxias, con el propósito de establecer la relación que existe entre los hoyos negros supermasivos y sus galaxias anfitrionas. Dará seguimiento a los destellos de rayos gamma, observándolos inmediatamente después de que sean descubiertos, para entender con más detalle la muerte de las estrellas masivas y el origen de los elementos químicos más pesados.

En el ámbito del Universo local, el GTM examinará nuestra galaxia, la Vía Láctea y otras galaxias para establecer la naturaleza y distribución del gas y del polvo de los cuales se forman las estrellas. Asimismo, sus observaciones contribuirán a establecer la existencia y naturaleza del hoyo negro masivo localizado en el centro de la Vía Láctea, ya que la ubicación geográfica del telescopio le permite una excelente

cobertura norte-sur y una sensibilidad extraordinaria para realizar observaciones interferométricas de base muy larga.

De cara a las ciencias planetarias y la astrobiología, el GTM será una herramienta muy poderosa, con la capacidad necesaria para buscar moléculas orgánicas complejas en el espacio y analizar con una sensibilidad sin precedentes la química y física de los cometas, que contienen muestras del material del cual se formó nuestro sistema planetario. Con él se realizará el primer censo detallado de objetos pequeños del Sistema Solar, como son los objetos cercanos a la Tierra, asteroides, centauros y objetos del Cinturón de Kuiper, y se estudiará la atmósfera de planetas y satélites. Por otro lado, con el GTM será posible detectar y caracterizar los discos de gas y polvo que rodean las estrellas, de los cuales se forman los planetas.

El nuevo telescopio incorpora avances significativos en el diseño de antenas, ya que emplea varios sistemas activos para alcanzar las especificaciones técnicas requeridas por los astrónomos. El reflector primario está formado por 180 segmentos que se mueven por medio de una computadora, haciendo del telescopio una estructura flexible que puede cambiar su forma para compensar las distorsiones producidas por la gravedad y los gradientes de temperatura. En el campo de la instrumentación milimétrica se han diseñado y fabricado receptores ultrasensibles con las tecnologías más innovadoras, que garantizan las extraordinarias prestaciones de este gran telescopio.

El GTM es un proyecto binacional entre México y Estados Unidos desarrollado como una colaboración entre el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica y la University of Massachusetts Amherst. Ambas instituciones trabajan activamente en la formación de las nuevas generaciones de científicos e ingenieros en los diferentes campos del conocimiento relacionados con el desarrollo y explotación del telescopio y sus instrumentos, así como en proyectos de divulgación científica. Las dos han establecido una asociación civil llamada Observatorio del Gran Telescopio Milimétrico, que operará el telescopio. El proyecto es una muestra de una colaboración enriquecedora y, sin duda, exitosa entre los dos países.

El presente libro constituye un esfuerzo colectivo por difundir el valor científico y cultural del GTM entre estudiantes y profesionales de cualquier disciplina. Para una visión global se recomienda el capítulo 1, donde se presentan los antecedentes del proyecto, los aspectos científicos y tecnológicos sobresalientes y aquellos relacionados con la formación de recursos humanos, la colaboración internacional, el papel del telescopio en el entorno mundial y la relación del proyecto con la sociedad.

En los capítulos posteriores se tratan en más detalle las áreas científicas en las que el GTM tendrá particular influencia. En el capítulo 2 se describen el origen y la evolución de las galaxias, más otros temas relacionados con la cosmología moderna. En el capítulo 3, la naturaleza de las galaxias del Universo local. En el capítulo 4, la formación de estrellas y el medio interestelar y en el capítulo 5, las ciencias planetarias y la astrobiología. En el capítulo 6 se describen los desarrollos tecnológicos más novedosos incorporados al GTM. Los receptores y espectrómetros que han incorporado tecnología de frontera se presentan en el capítulo 7. El papel que este proyecto ha tenido y seguirá teniendo en la formación de recursos humanos en México y en Estados Unidos se recoge en el capítulo 8. La contribución del proyecto a la conservación del medio ambiente y la vinculación con el público se describen en el capítulo 9, y el Observatorio del Gran Telescopio Milimétrico en el capítulo 10. Al final se presenta un glosario de términos frecuentes.

1. Introducción

EL GRAN TELESCOPIO MILIMÉTRICO es un telescopio de 50 m de diámetro que opera en ondas milimétricas. Será el más grande y poderoso de los telescopios de su tipo en el mundo. Explorará el Universo temprano para caracterizar los procesos que llevaron a la formación de las galaxias, las estrellas y los planetas que vemos hoy. Permitirá realizar avances fundamentales en todas las áreas de la astronomía y las ciencias planetarias.

El nuevo telescopio es el mayor proyecto científico realizado hasta ahora conjuntamente por México y Estados Unidos. Está concebido como una colaboración entre pares, dirigido por dos institutos de investigación astronómica de excelencia en sus respectivos países: el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en México y la University of Massachusetts Amherst en Estados Unidos. El telescopio se encuentra en la cima del volcán extinto Tliltépetl, también conocido como Sierra Negra, a 4 580 m de altitud, ubicado dentro del Parque Nacional Pico de Orizaba, a casi 100 km de la ciudad de Puebla, y aproximadamente la misma distancia del golfo de México.



FIGURA 1.1. Mapa de México, con la localización del GTM. La sede del INAOE está en Tonantzintla, cerca de la ciudad de Puebla. [México: Imagen satelital. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2002].

1.1 El Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica y la astronomía en México

La astronomía en México data de tiempos muy antiguos. 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 sugieren que el arte de contar el tiempo estaba íntimamente relacionado con la astronomía. De acuerdo con algunos investigadores del tema,¹ las cuidadosas observaciones de la repetición cíclica de los eventos celestes produjeron un calendario más preciso que el calendario gregoriano, que se utiliza hoy en todo el mundo. Las culturas prehispánicas recogieron fechas en monolitos verticales, llamados estelas, así como en manuscritos, y muchas de las inscripciones originales se consideran verdaderas obras de arte.



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



FIGURA 1.3. El cometa de Moctezuma. El emperador contempla el cometa desde la azotea de su palacio. Fondos de la Biblioteca Nacional de España.²

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 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 Dresde, uno de los pocos documentos prehispánicos que se conservan en la actualidad, da testimonio inequívoco de la genialidad del

astrónomo-sacerdote maya. El código incluye tablas de posiciones venusinas, lunares y eclipses, de gran precisión astronómica.

Esta enigmática civilización del México antiguo ha intrigado a muchas generaciones y nos continúa fascinando hoy 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,³ y se han encontrado indicios que sugieren que los mayas observaron al menos uno de los tránsitos de Venus en el siglo XIII.

La investigación astronómica moderna en México comenzó en 1942 con la fundación del Observatorio Astrofísico Nacional 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 descu-

brimiento de los objetos protostelares Herbig-Haro, las estrellas ráfaga y las galaxias azules con líneas de emisión. En 1972, el Observatorio de Tonantzintla se transformó en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, que es uno de los centros de investigación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). Se fundó con el propósito de desarrollar, avanzar y divulgar el conocimiento mediante la identificación y solución de problemas científicos y la formación de especialistas en astro-

física, óptica y electrónica, y más recientemente se incluyeron las 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.

En la tabla 1.1 figuran los principales centros de investigación astronómica de México. 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



FIGURA 1.4. Vista del campus del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, en Tonantzintla, Puebla.

TABLA 1.1. Principales centros de investigación astronómica en México

| <i>Institución</i> | <i>Sigla</i> | <i>Localización</i> |
|---|--------------|--------------------------------|
| Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica | INAOE | Tonantzintla |
| Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México | IAUNAM | Ciudad de México y Ensenada |
| Centro de Radioastronomía y Astrofísica, Universidad Nacional Autónoma de México | CRYA | Morelia |
| Departamento de Astronomía, Universidad de Guanajuato | | Guanajuato |

investigación en astrofísica observacional o teórica, cubriendo todo el espectro electromagnético, desde las ondas de radio 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 puesta en marcha 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 por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. El otro se ubica en el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, Baja California, y está administrado por el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (IAUNAM). Ambos telescopios fueron construidos con recursos nacionales principalmente, lo que implicó la formación de los primeros grupos de instrumentistas del país. Los dos institutos son además copartícipes en el telescopio de 10.4 m de diámetro, Gran Telescopio Canarias, que se encuentra en construcción en España. Los astrónomos mexicanos también hacen uso frecuente de telescopios ópticos/infrarrojos de mayor apertura y de telescopios internacionales como el telescopio espacial Hubble, los Gemini, los localizados en el Observatorio Interamericano Cerro Tololo, o los del Observatorio Europeo Austral. El acceso a estos telescopios se logra mediante competencia por tiempo abierto entre la comunidad internacional o mediante colaboraciones con institutos miembros.

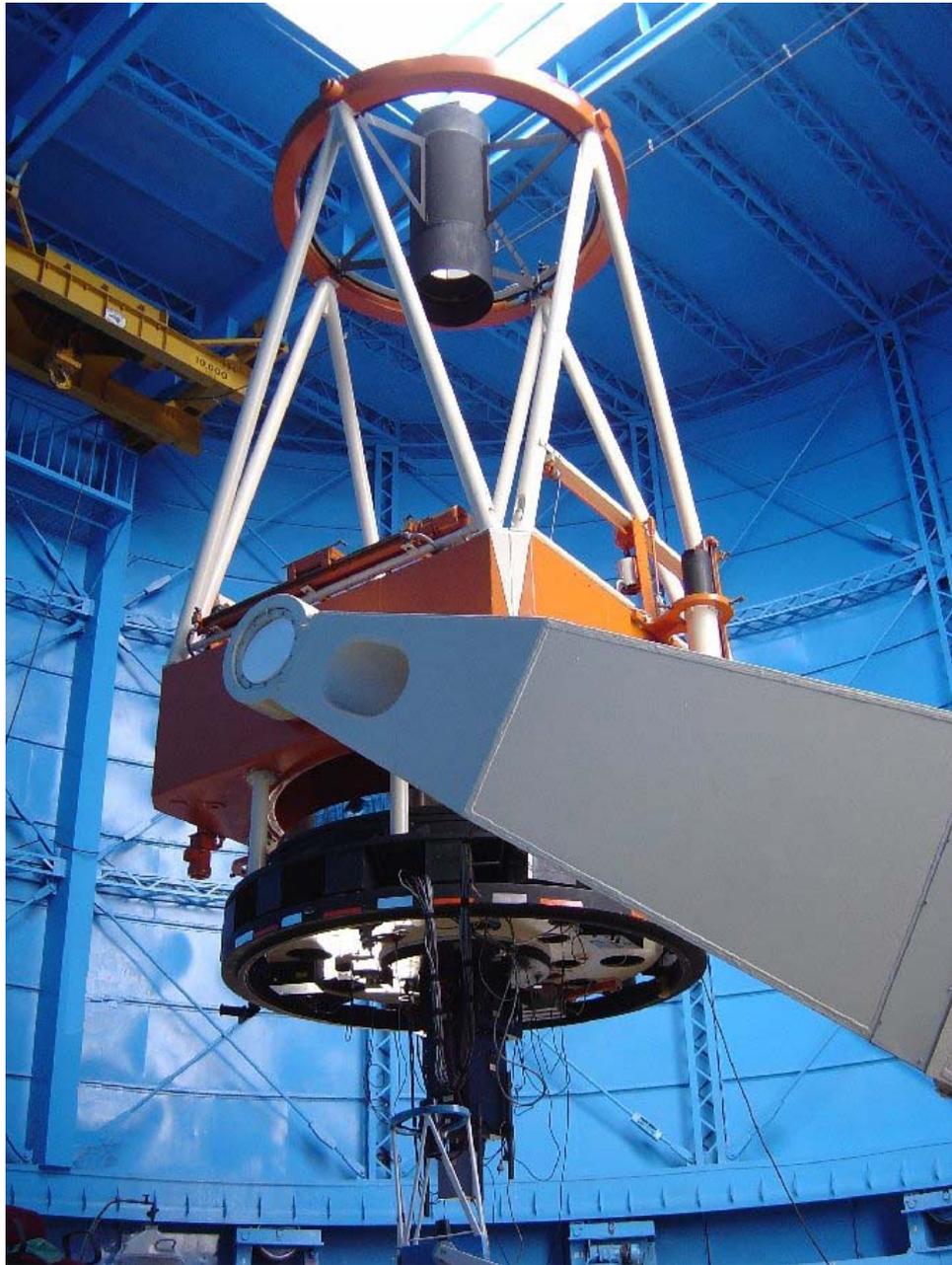


FIGURA 1.5. El telescopio de 2.1 m del Observatorio Astrofisico Guillermo Haro, en Cananea, Sonora.

A finales de los años ochenta ya era patente que la infraestructura observacional era insuficiente para abastecer las necesidades de la creciente comunidad astronómica nacional. También era evidente que la tarea de construir un telescopio de alta calidad, con tecnología de frontera, sólo podía ser realizada en colaboración con otros países, 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 a 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 en torno a una colaboración de largo plazo entre astrónomos mexicanos y estadounidenses.

En este contexto, los investigadores y estudiantes del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 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, como el telescopio de 10 m del Caltech Submillimeter Observatory (CSO) y el de 15 m James C. Maxwell (JCMT), en Hawai, los de 10 y 12 m del Arizona Radio Observatory y los telescopios del Institut de Radioastronomie Millimétrique (IRAM), ubicados en España y Francia. Algunos investigadores forman parte de los equipos científicos de otros experimentos milimétricos en desarrollo, como el Balloon-borne Large Aperture Sub-millimeter Telescope (BLAST), de 2.5 m, y de la antena de 6 m del Atacama Cosmology Telescope (ACT).

El GTM es el mayor proyecto científico realizado en México en cualquier campo del conocimiento, con un presupuesto que sobrepasa en un orden de magnitud 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 *per se* para demostrar que México puede construir instrumentos científicos avanzados. 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 con las especificaciones establecidas por la compañía que diseñó la antena, MAN Technology, de Alemania. El instituto, además, está construyendo el reflector secundario con tecnología de fibra de carbono y desarrollando 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 La astronomía en la University of Massachusetts Amherst

La University of Massachusetts Amherst es uno de los miembros fundadores del Four College Astronomy Department, formado en 1960 para ligar la educación en astronomía de los estudiantes de la universidad y del Amherst College, el Mount College, el Holyoke College y el Smith College, grupo que subsecuentemente se expandió para incluir el Hampshire College en 1970. El programa de posgrado, ahora establecido en el departamento de astronomía de la universidad, ofrece 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 National Aeronautics and Space Administration (NASA), en el National Radio Astronomy Observatory (NRAO), en otros laboratorios gubernamentales y en la industria.

La investigación basada en estudios teóricos y en observaciones con telescopios espaciales y terrestres, desde ondas de radio hasta los rayos X, ha sido y sigue siendo una componente importante del programa desarrollado en la universidad. Los miembros del departamento han llevado a cabo, por ejemplo, el proyecto 2MASS, que consiste en un mapa de todo el cielo a $2\ \mu\text{m}$. También han desempeñado un papel fundamental en el Submillimeter-Wave Astronomy Satellite (SWAS).

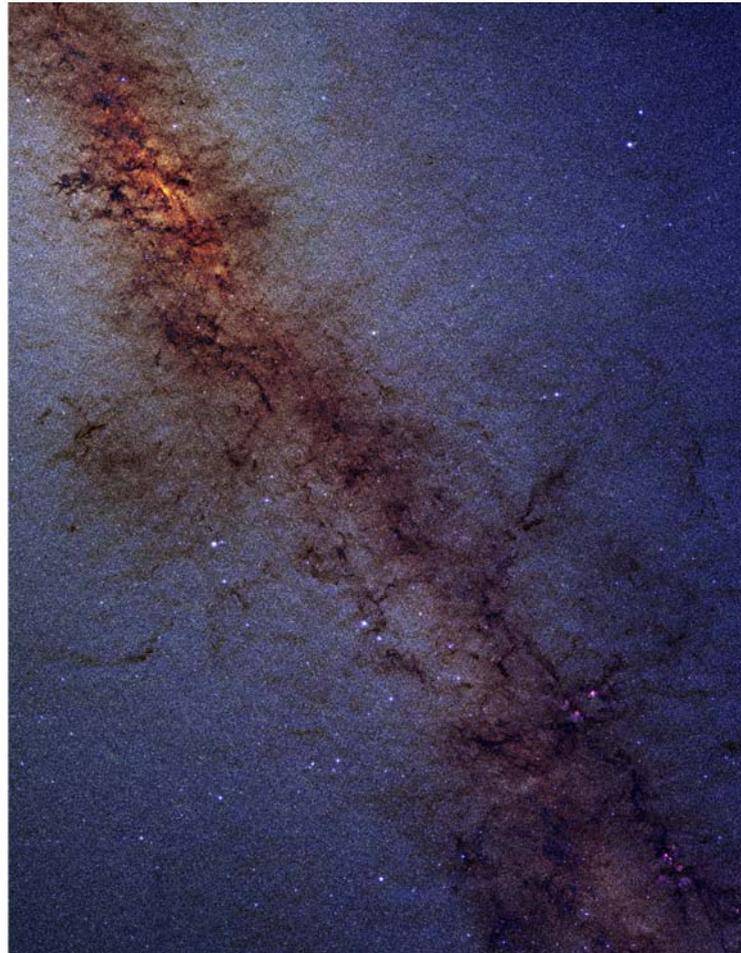


FIGURA 1.6. Imagen de 2MASS del Centro Galáctico. [2MASS/University of Massachusetts Amherst/IPAC-Caltech/NASA/NSF].

Por otro lado, son usuarios frecuentes del telescopio espacial Hubble y del observatorio 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 de radio. El Five College Radio Astronomy Observatory (FCRAO) se fundó a unos 30 km de la universidad en 1969, inicialmente para realizar estudios de pulsares en ondas milimétricas con cuatro telescopios de 30 m tipo Arecibo, ligados entre sí. El descubrimiento de la emisión del monóxido de carbono en ondas milimétricas en 1970, motivó 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 mayor telescopio de su tipo en América del Norte. Desde entonces el 14 m del FCRAO ha desempeñado un papel fundamental en la investigación astronómica en el ámbito 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 indicios de radiación gravitatoria—lo cual le valió el Premio Nobel a Russell Hulse, estudiante de posgrado, y al profesor Joseph Taylor— hasta las primeras cámaras milimétricas, los llamados ensambles 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 del FCRAO, se empezó a estudiar la posibilidad de construir un telescopio de gran apertura, más grande aún que los hasta entonces existentes. Sin embargo, esta tarea sobrepasaba la capacidad de una sola universidad. Algunos investigadores ya habían 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

Las dos instituciones copartícipes en el proyecto GTM reconocen una triple responsabilidad en su misión: desarrollar investigación pionera, preparar a las nuevas generaciones de científicos y desarrollar tecnología para beneficio de la sociedad.

1.3.1 Ciencia

La naturaleza interdisciplinaria de la astronomía implica que los nuevos descubrimientos afectan directamente a otras áreas de la ciencia como la física, la química, la geología, las ciencias planetarias y la biología. Las razones por las que las



FIGURA 1.7. El telescopio de ondas milimétricas de 14 m de diámetro del Five College Radio Astronomy Observatory.

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 el hecho de 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 entre 10 y 20 K, demasiado frías como para radiar en ondas más cortas que las bandas milimétricas y submilimétricas y, por lo tanto, sólo se pueden observar 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, el ultravioleta e incluso en el infrarrojo, pero no en el milimétrico, ya que las dimensiones de los granos de polvo son menores de un milímetro.

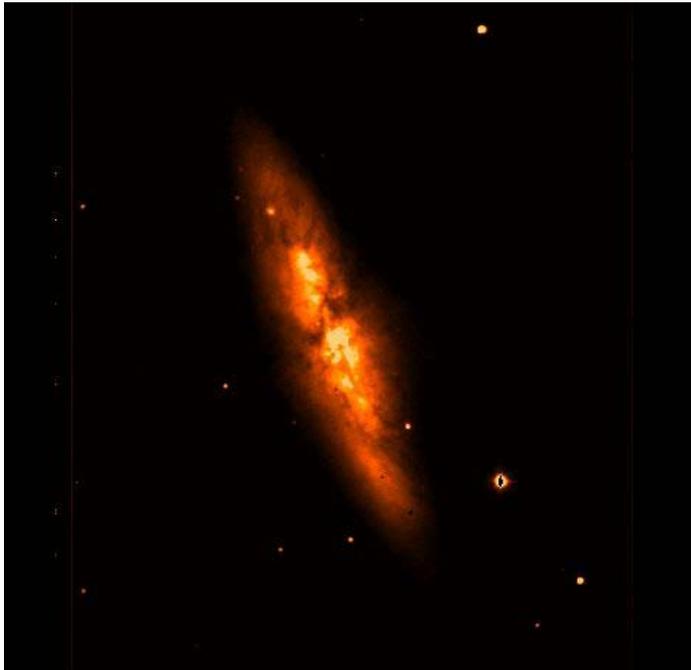


FIGURA 1.8. Galaxia M82, imagen tomada en la banda-R en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro en Sonora, administrado por el INAOE.

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 rerradia en el infrarrojo lejano. De hecho, las galaxias que forman estrellas masivas o que contienen núcleos activos de galaxias, que están probablemente potenciados por agujeros 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 de la nueva generación de astrónomos, ingenieros y técnicos ha sido siempre una responsabilidad fundamental del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. 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 en el instituto que se han formado en áreas relacionadas con el GTM ha crecido significativamente: no sólo astrónomos, sino también ingenieros y técnicos que han realizado 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 la University of Massachusetts Amherst más de la mitad de los doctorados en astronomía están basados en investigación en ondas de radio y se espera que el GTM permita continuar esta tendencia. Dada la gran inversión de Estados Unidos en astronomía milimétrica, con proyectos como el Atacama Large Millimeter Array (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 continúe con el GTM.

1.3.3 Desarrollo de nueva tecnología

Entre los temas de estudio del GTM podemos mencionar la emisión proveniente de galaxias que se encuentran a miles de millones de años luz, las moléculas

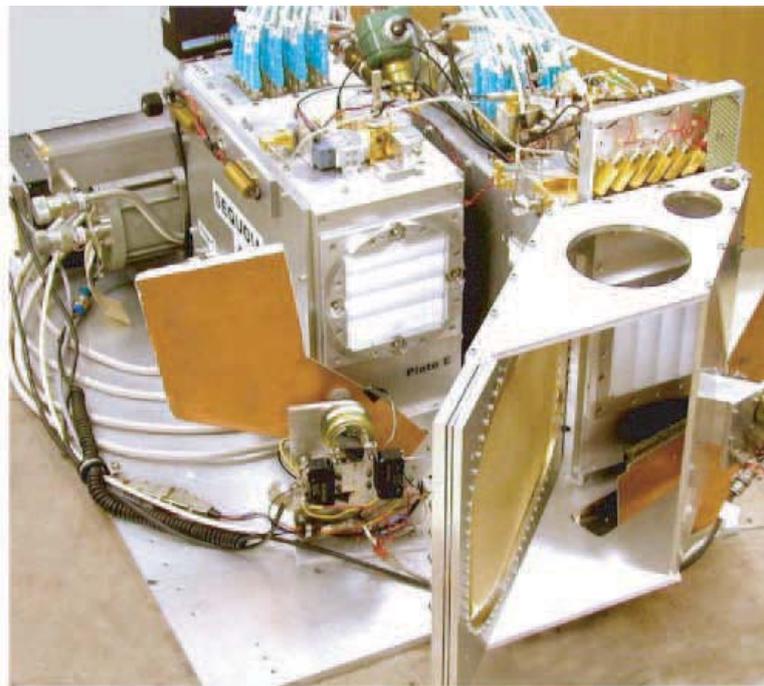


FIGURA 1.9. La cámara milimétrica SEQUOIA, compuesta por una matriz de receptores de plano focal, será uno de los primeros instrumentos del GTM. Actualmente se encuentra en operación en el telescopio de 14 m del FCRAO.

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 diseñar, desarrollar y construir en los institutos de investigación participantes.

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 telescopio debe 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 propósito de mantener la forma de esta estructura gigantesca y conservar la precisión de apuntado requerida, el GTM está dotado de un conjunto 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, como se aprecia en la figura 1.4.1 de la página siguiente. Operará con excelente eficiencia a longitudes de onda mayores de 1 mm, y será capaz de realizar observaciones a 0.85 mm. Las especificaciones técnicas son muy exigentes, como se muestra 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 para las delicadas observaciones del continuo.

TABLA 1.2. Especificaciones técnicas del GTM

| <i>Propiedad</i> | <i>Especificaciones</i> | <i>Objetivo</i> |
|---------------------------------|-------------------------|----------------------|
| 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.

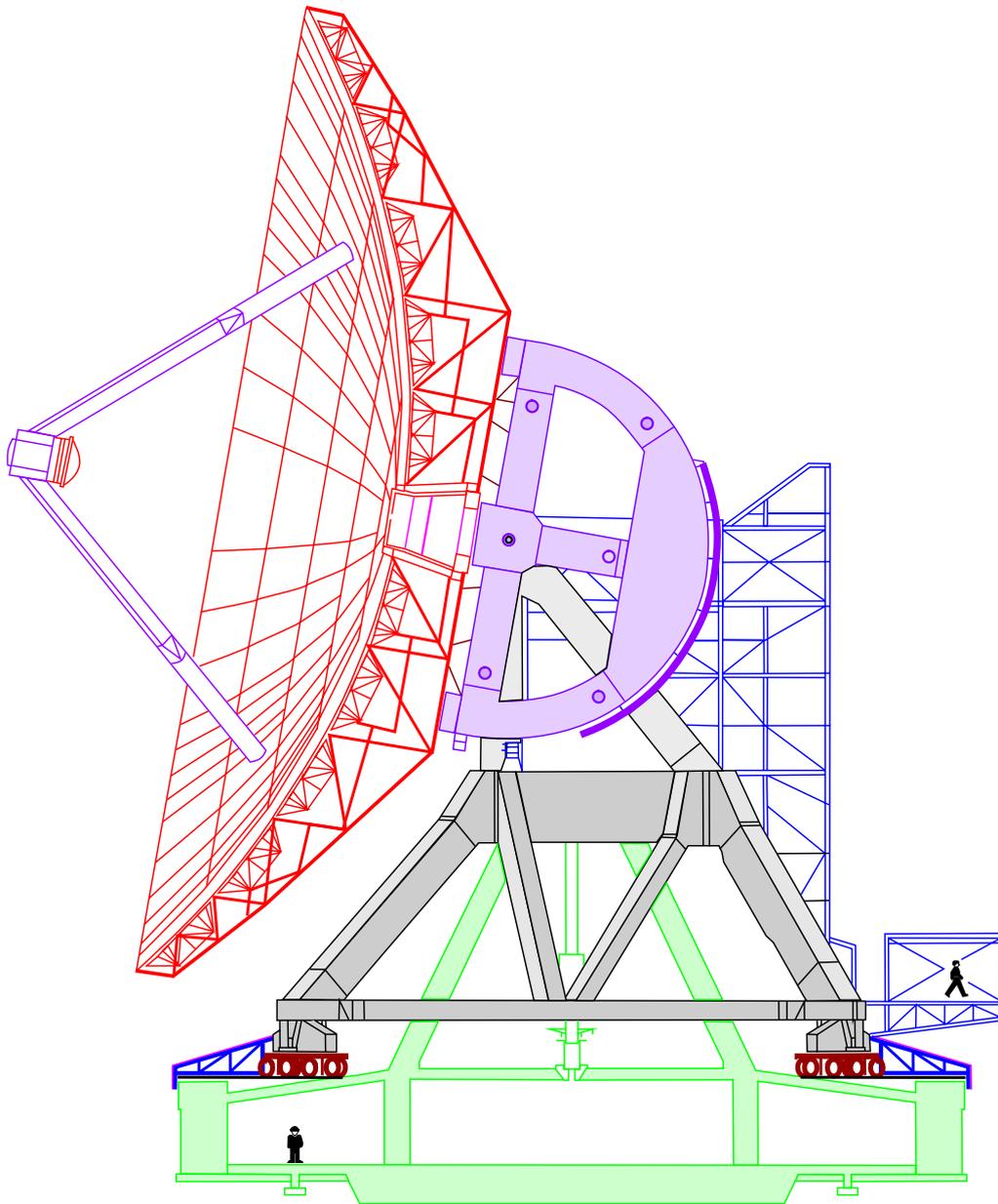


FIGURA 1.10. Diagrama esquemático del Gran Telescopio Milimétrico.

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 por medio de un armazón o submarco posterior. La posición de cada submarco 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 críticas 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 temperaturas 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, 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, como las desviaciones del perfil del espejo primario o la deslocalización del subreflector 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.

1.5 El sitio

El GTM se encuentra a una altitud de 4 580 m, 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 Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, con un tiempo total de viaje por carretera de 2 horas. La localización del Tliltépetl a 19° de latitud norte



FIGURA 1.11. El Tliltépetl, también conocido como volcán Sierra Negra, se localiza a 4 580 m de altitud. Al fondo se ve el Citlaltépetl, el pico más alto de México (5 747 m).

es un aspecto atractivo del sitio, ya que el telescopio será capaz de estudiar importantes fuentes del cielo austral, como el Centro Galáctico, que pasa por el meridiano a una elevación de 45° .

El Tliltépetl fue seleccionado de entre una lista de picos elevados de México por las excelentes características radiométricas de su cielo. 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 nueve meses al año.

Las condiciones meteorológicas son moderadas para la gran elevación del sitio: las nevadas son en general 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 el apuntado. Los cuartiles

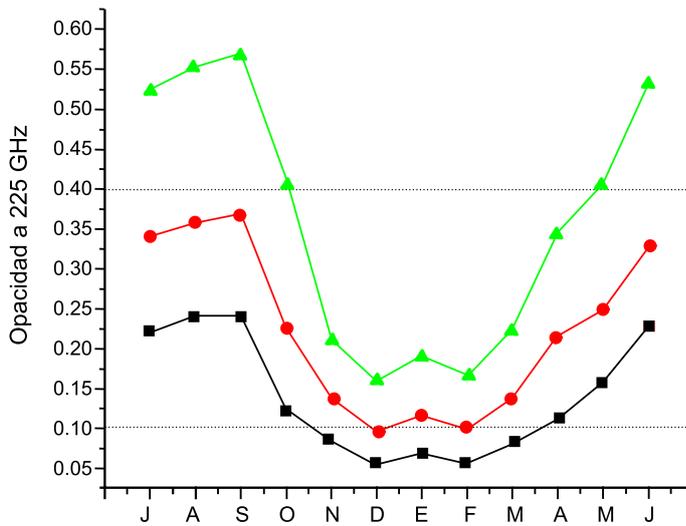


FIGURA 1.12. Opacidad a 225 GHz en el Tliltépetl. La escala horizontal indica el mes del año, de julio (J) a junio (J). Como opacidad se representan los cuartiles primero, segundo y tercero de la distribución de medidas tomadas por el radiómetro del GTM.⁴

primero, segundo y tercero 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 propósito de que se apegue a las especificaciones técnicas a menos de 10 m/s, lo que ocurre la mayor parte del tiempo.⁵

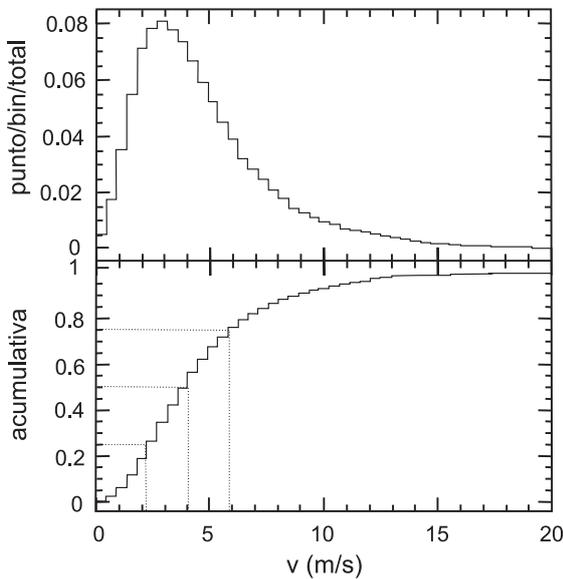


FIGURA 1.13. Velocidad del viento en el Tliltépetl, caracterizada con datos tomados entre octubre de 2000 y agosto de 2003. Se representan las distribuciones diferenciales y acumuladas de las medidas tomadas.⁵

A pesar de todas estas precauciones, la operación de un telescopio como GTM en un sitio de tanta elevación no es trivial. Los edificios del telescopio 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.

1.6 Instrumentación

La instrumentación inicial ha sido seleccionada por un grupo científico compuesto por integrantes del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica y de la University of Massachusetts Amherst con el fin de explotar al máximo las características especiales de una antena tan grande. En las dos instituciones se seguirá generando nueva instrumentación para mantener al GTM en la frontera de la investigación en los años venideros.

Con casi 2 000 m² 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 y de receptores incoherentes de banda ancha, para realizar observaciones del continuo de alta sensibilidad.

El proyecto GTM está colaborando con un grupo internacional en la construcción de un ensamble 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. La cámara AZTEC se compone de 144 elementos de imagen o píxeles 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 del continuo que medirá la distribución espectral de energía es la cámara SPEED. Realizará observaciones simultáneas en cuatro bandas, 2.1, 1.3, 1.1 y 0.85 mm, utilizando la nueva tecnología de bolómetros de frecuencia selectiva. Las distribuciones espectrales de energía trazadas por esta cámara 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



FIGURA 1.14. El criostato y la electrónica de lectura de la cámara de emisión térmica AZTEC en el Cryogenic Device Laboratory de la University of Massachusetts Amherst.

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 una cámara heterodina de plano focal de 32 pixeles, llamada SEQUOIA, que lleva asociado un espectrómetro autocorrelador digital. La cámara 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 fosfato de indio, con un ruido de banda tan bajo como 30 K a 103 GHz, diseñados en la University of Massachusetts Amherst. Esta cámara ya ha producido resultados de gran calidad, como el mapa más extenso del contenido de gas de nuestra galaxia. Sin duda, desempeñará un papel vital en la caracterización de la física y química del material interestelar de la Vía Láctea y de otras galaxias. El instrumento se está utilizando en la actualidad en el 14 m del FCRAO, y se instalará en el GTM.

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 ultraancha, 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-

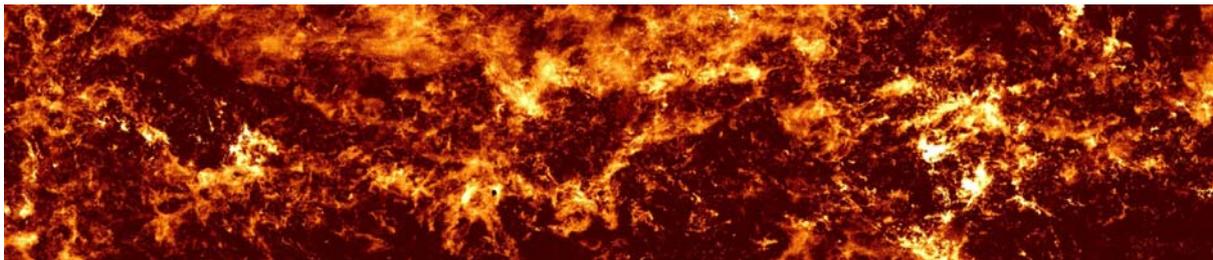


FIGURA 1.15. Porción de 330 grados cuadrados del exterior de la Vía Láctea, cartografiada con una cámara que precedió a la SEQUOIA actual.⁶ La imagen muestra la emisión de monóxido de carbono (CO), uno de los trazadores del gas molecular utilizado habitualmente.

aislante-superconductor, en un esquema de bandas laterales. Operará en la banda de 210 a 275 GHz, que cubre la ventana atmosférica de 1.3 mm. A largo plazo se planea construir un ensamble de plano focal de frontera, que realice espectroscopía a 1 mm, tomando este receptor como modelo.

1.7 Interferometría de base muy larga con el GTM

La técnica de interferometría de base muy larga 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. Dicha técnica 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 interferometría de base muy larga 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.

La interferometría de base muy larga será transformada 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 entre 86 y 230 GHz. Entre estos nuevos telescopios, el principal contribuyente es el GTM. El interferómetro formado por el Very Long Baseline Array (VLBA) cuando incluya el telescopio 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 de interferometría de base muy larga. El segundo factor que mejorará la sensibilidad es la nueva generación de sistemas de grabado de datos, que incrementará el ancho de banda por un factor de 16 antes de que

el GTM vea la primera luz. Conjuntamente, los avances 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 que permitirá hacer interferometría de base muy larga no está incluido en los planes iniciales de instrumentación del GTM, pero se prevé establecer una colaboración para tener acceso a uno de ellos.

1.8 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 de tres a cinco veces mejores que las ofrecidas a las mismas frecuencias por telescopios 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 de 20 a 50% de las fuentes que crean la emisión conjunta del fondo extragaláctico milimétrico. Puesto que menos de 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 interferómetros (sub)milimétricos, como ALMA y el Combined Array for Research in Millimeter-wave Astronomy (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. (2001), *Skywatchers: A Revised and Updated Version of Skywatchers of Ancient Mexico*, University of Texas Press, Austin. [Hay edición en español: *Observadores del cielo en el México antiguo*, Fondo de Cultura Económica, México, 2005.]

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 10 antenas de 6.1 m; ALMA: 64 antenas de 12 m. [G. Narayanan, University of Massachusetts 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 (1mm) | X | 25 | 1.0 | 8.8 | 6.6 |
| Velocidad 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 | 2.1 |
| Velocidad de cartografía para fuentes extendidas | | | | | |
| Línea (3 mm) | 350 | 7.7 | 1.0 | 10 | 5.8 |
| Continuo (1 mm) | X | 1900 | 1.0 | 320 | 180 |

[2] Durán, D. [1579], *Historia de las Indias de Nueva España e Islas de Tierra Firme*, Fondos de la Biblioteca Nacional de España. [Hay edición preparada por Ángel Ma. Garibay: Porrúa, México, 1984.]

[3] Galindo, J. y Allen, Ch. (2004), “Maya observations of the 13th century transit of Venus?”, en memorias del coloquio de la UAI núm. 196, Kurtz, D.W. y Bromage, G.E. (eds.), Cambridge University Press.

[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, RTO 548.
- [6] Heyer, M. *et al.* (1998), “The Five College Radio Astronomy Observatory CO Survey of the Outer Galaxy”, *Astrophys. J. Suppl.* **115**, 241.

2. La cosmología y el origen y la evolución de las galaxias

2.1 Introducción

EN 1997 el U.S. National Research Council's Committee on Astronomy and Astrophysics estableció las áreas de la astronomía y la astrofísica que, por su importancia científica, debían pasar a ser prioritarias en las siguientes décadas. Se declaró que las cuatro prioridades científicas a resolver eran: 1] la determinación de la geometría y el contenido energético del Universo mediante la caracterización de las anisotropías del fondo de radiación cósmica; 2] el estudio de las galaxias en su época de formación, a muy alto corrimiento al rojo; 3] la detección y estudio de los planetas que circundan las estrellas cercanas, y 4] la caracterización de las propiedades de los hoyos negros de todos los tamaños.

Las prestaciones del GTM y su programa científico dedicado a la formación y evolución de las estructuras a alto corrimiento al rojo responden cabalmente a las recomendaciones de dicho informe estratégico. Las áreas de investigación mencionadas son particularmente relevantes para la astronomía en general, como se describe a continuación.

La formación estelar del Universo está localizada principalmente en el medio interestelar de las galaxias, que son zonas donde hay mucho polvo y, por lo tanto, son regiones fuertemente oscurecidas. Tal actividad estelar puede pasar inadvertida en la cartografía ultravioleta, visible e infrarroja del cielo. Sin embargo, la radiación milimétrica y submilimétrica ofrece una visión casi transparente del cielo, y de ahí que la astronomía milimétrica proporcione una oportunidad única de desafiar los supuestos que hasta ahora se han aceptado para explicar los procesos físicos que gobiernan la formación de las estructuras del Universo, y que

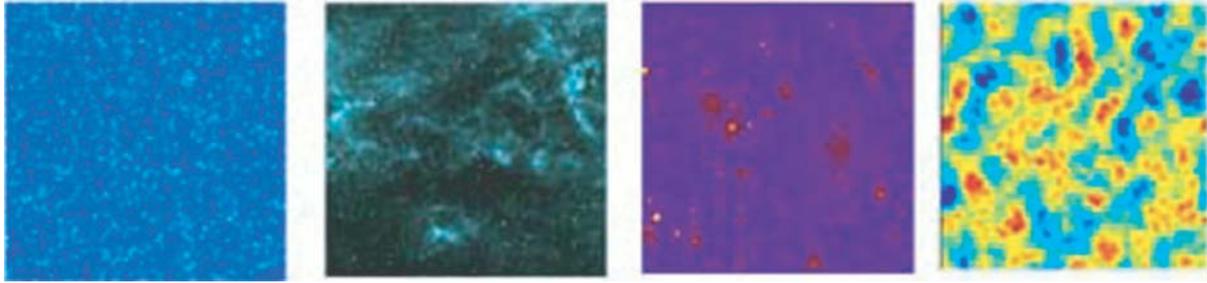


FIGURA 2.1. De izquierda a derecha, simulación en ondas milimétricas de la población de galaxias en formación, los cirros galácticos, el efecto Sunyaev-Zel'dovich de los cúmulos de galaxias y las fluctuaciones del fondo de radiación cósmica de microondas. Estas simulaciones se amalgaman para realizar mapas del cielo extragaláctico que, tras ser procesados por un simulador de telescopio, estiman la factibilidad de los censos que se realizarán con el GTM.¹

controlan la subsiguiente evolución de las galaxias y cúmulos de galaxias que vemos hoy día.

En los últimos años se ha desarrollado un gran esfuerzo teórico, experimental y observacional para resolver algunas de las cuestiones fundamentales de la cosmología. Cuando el Universo tenía menos de 10% de su edad actual, las primeras galaxias ya se habían formado mediante la agregación de la primera generación de estrellas, que pasó a enriquecer el medio interestelar primigenio con elementos pesados y otros subproductos de la formación estelar. El medio físico del Universo a alto corrimiento al rojo es potencialmente muy diferente del medio que nos rodea, y nos fuerza a poner en duda la suposición naíf de que los detalles de los procesos y eficiencias de la formación estelar sean iguales a los que conocemos localmente. Para comprender la formación y evolución de las galaxias debemos, por lo tanto, entender los procesos de formación y la historia evolutiva de las estrellas, y localizar las galaxias y los cúmulos galácticos en el contexto de la distribución de materia, que evoluciona desde las estructuras iniciales detectadas por medio de las anisotropías del fondo de radiación cósmica de microondas.

2.2 Historia de la formación estelar ópticamente oscurecida

Los brotes de formación estelar violenta en galaxias polvosas, ópticamente oscurecidas, se manifiestan en forma de un fuerte campo de radiación que va desde el

infrarrojo lejano a las ondas milimétricas. Conforme aumenta el corrimiento al rojo (z) de las galaxias, el pico de emisión infrarroja se corre hacia el régimen milimétrico y, por lo tanto, las observaciones milimétricas pueden trazar la evolución de la formación estelar contenida en galaxias polvosas a lo largo de un gran volumen del Universo a alto z .

En principio, las galaxias se pueden detectar en ondas milimétricas con la misma facilidad a $z \sim 8$ que a $z \sim 1$. Dado el gran volumen a explorar, los censos milimétricos pueden poner a prueba si estas galaxias representan la formación de los sistemas galácticos más masivos, como son las galaxias elípticas, en un solo episodio violento, al precipitar la materia que se encuentra alrededor de los picos de densidad de la distribución cósmica de materia a sus centros, o si su formación requiere periodos mucho más extendidos, agregando materia de sistemas poco masivos, con tasas de formación estelar mucho más bajas.

El principal objetivo científico del GTM es aprovechar su alta resolución angular, sensibilidad y velocidad de cartografía para comprender la historia de la evolución de las poblaciones de galaxias que dominan la emisión del fondo extragaláctico, emitido del infrarrojo lejano al milimétrico, lo que supone $\sim 50\%$ de la energía integrada emitida por el Universo mediante objetos discretos.

El GTM realizará un conjunto de censos pequeños y profundos, hasta llegar al límite de confusión, y también censos superficiales amplios para, conjuntamente, caracterizar el Universo a alto corrimiento al rojo en longitudes de ondas milimétricas. Al complementar estas observaciones con otras observaciones multifrecuencia, podremos: 1] identificar las galaxias que forman la emisión del fondo extragaláctico, del infrarrojo lejano al milimétrico, y determinar sus corrimientos al rojo; 2] medir sus luminosidades bolométricas, tasas de formación estelar y la evolución de sus funciones de luminosidad; 3] determinar la fracción de núcleos activos de galaxias y las de las diferentes poblaciones de galaxias infrarrojas; 4] medir el agrupamiento espacial de estas galaxias, y 5] caracterizar las propiedades espectroscópicas y del continuo de estas poblaciones de galaxias.

2.2.1 Censos cosmológicos

Las primeras generaciones de censos submilimétricos y milimétricos^{2,3} se han llevado a cabo con las cámaras SCUBA y MAMBO, que cuentan con ensambles bolométricos de tamaño modesto (~ 100 pixeles) en los telescopios de 15 m JCMT y de

FIGURA 2.2. Efecto del corrimiento al rojo sobre la densidad de flujo observada proveniente de un objeto con la luminosidad de la galaxia infrarroja ultraluminosa Arp 220. De arriba abajo, a $z = 0.2$, las curvas representan la densidad de flujo observada a 160, 250, 500, 850, 1110, 1400, 2100 y 3300 μm , respectivamente. [D.H. Hughes, INAOE].

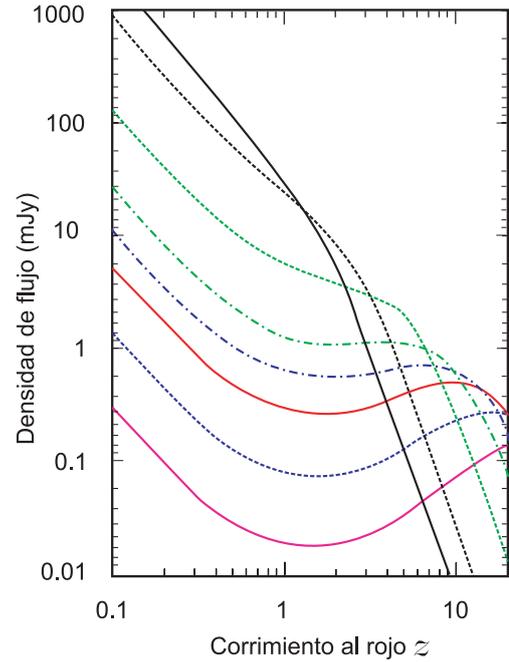
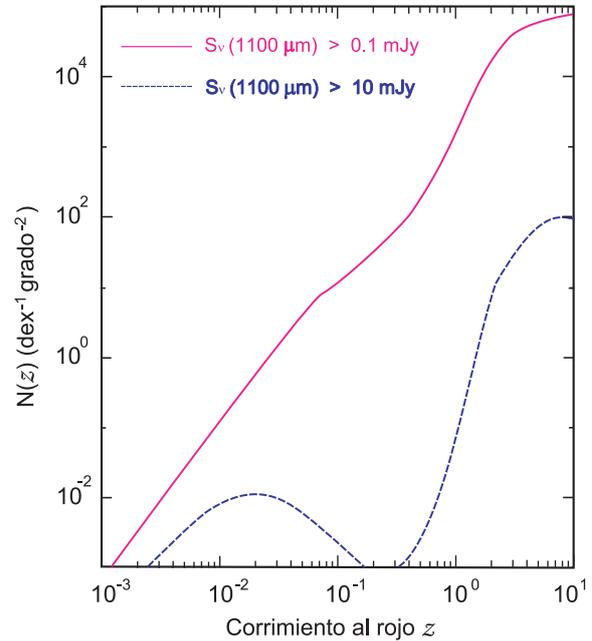


FIGURA 2.3. Distribución de corrimientos al rojo de galaxias polvosas con brotes de formación estelar en censos como los que se desarrollarán con el GTM. Los censos profundos de regiones pequeñas (curva continua) estarán dominados por la población de alto corrimiento al rojo ($z \gtrsim 2$), mientras que los censos superficiales de amplio campo (curva discontinua) estarán caracterizados por una distribución bimodal, que incluirá tanto galaxias distantes como galaxias brillantes del Universo local ($z \lesssim 0.05$). [D.H. Hughes, INAOE].



30 m del IRAM. Dichos censos cubren áreas que abarcan desde unos cuantos minutos de arco cuadrados hasta medio grado cuadrado, y han realizado las primeras medidas de la historia de la formación estelar oscurecida del Universo temprano. Sin embargo, las observaciones descritas no pueden, por sí solas, determinar exactamente cuál es la evolución y distribución a gran escala de la población de galaxias milimétricas. La figura 2.4 ilustra las dos razones fundamentales por las que esto ocurre: en primer lugar, las medidas de la densidad de la población derivadas de los diversos censos extragalácticos cubren un intervalo pequeño de brillos, y en segundo lugar, la incertidumbre en la densidad de fuentes es sustancial, ya que se han detectado menos de 100 de galaxias milimétricas con una razón señal a ruido mayor de cuatro. Con una estadística tan limitada, es difícil determinar la densidad de flujo a la que la densidad de fuentes converge para brillos débiles y, por lo tanto, la contribución del total de la población milimétrica al fondo de emisión extragaláctico. El agrupamiento de galaxias y el pequeño tamaño de las áreas cubiertas en los censos también dificultan el conteo de las fuentes menos brillantes, y la rareza de las fuentes más brillantes no permite saber si existe un corte en la evolución de la función de luminosidad o en la distribución de corrimientos al rojo de la población milimétrica.

Las razones prácticas que gobiernan las limitaciones arriba señaladas son la pequeña cobertura en frecuencia impuesta por las ventanas atmosféricas del infrarrojo lejano al milimétrico disponibles desde la Tierra; la baja resolución espacial, lo que implica un alto ruido por confusión, además de una reducida precisión posicional; el restringido campo de visión impuesto por el tamaño de los ensambles bolométricos disponibles, de típicamente 5 min de arco cuadrados, y la baja sensibilidad del sistema, resultado de la combinación del ruido instrumental, la apertura

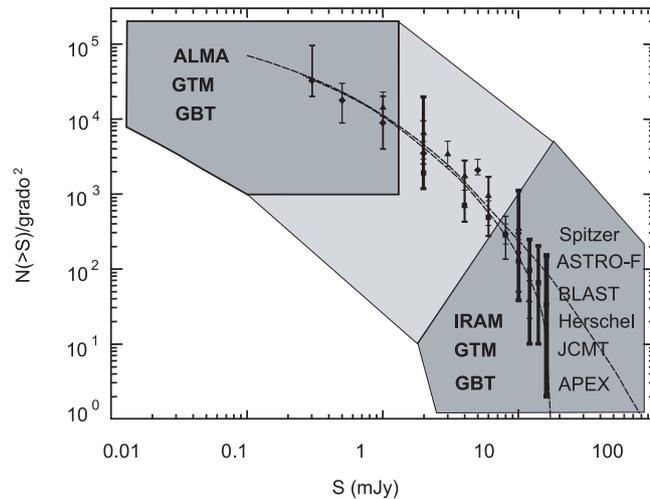


FIGURA 2.4. Densidad de fuentes extragalácticas a $850 \mu\text{m}$, como función del flujo medido en los censos SCUBA. La línea continua representa uno de los muchos posibles modelos de evolución de la población que reproducen los datos a $850 \mu\text{m}$.⁴ Las nuevas generaciones de instrumentos (sub)milimétricos listados en la figura explorarán fundamentalmente las zonas gris oscuro, que se encuentran por debajo de los límites de confusión o por encima de las capacidades cartográficas de la infraestructura con que se cuenta en la actualidad.

y precisión de la superficie del telescopio, y de la transmisión y el ruido del cielo. Todos los factores mencionados restringen el tamaño de los censos más amplios a menos de medio grado cuadrado, de tal forma que los censos milimétricos existentes son necesariamente sensibles sólo a las galaxias más masivas y luminosas, $L_{\text{IR}} \gtrsim 3 \times 10^{12} L_{\odot}$, lo que corresponde a tasas de formación estelar mayores de 300 masas solares (M_{\odot}) por año, si es que la población está localizada a $z \gtrsim 1$, suposición que es consistente con los corrimientos al rojo espectroscópicos y fotométricos con los que se cuenta hasta el momento.

Los censos desarrollados con el GTM superarán estas dificultades. El GTM utilizará su gran velocidad de cartografía, sensibilidad y resolución angular para medir la densidad superficial y las propiedades de agrupamiento de las galaxias fuertemente oscurecidas entre $850 \mu\text{m}$ y 3 mm , sobre un intervalo amplio de densidades de flujo, convirtiéndose así en uno de los instrumentos más potentes del futuro en el régimen que va desde el infrarrojo lejano al milimétrico⁴. El GTM podrá detectar galaxias con luminosidades $L_{\text{IR}} \gtrsim 10^{11} L_{\odot}$ y tasas de formación estelar $\gtrsim 10$ a $50 M_{\odot}/\text{año}$, caracterizando galaxias más típicas que las encontradas en los censos que se han realizado hasta el momento y, al mismo tiempo, podrá descubrir galaxias extraordinariamente luminosas del Universo a alto corrimiento al rojo. Un modo en extremo violento de formación estelar podría estar asociado con la súbita formación de las galaxias elípticas masivas, en escalas de tiempo menores que unos cuantos miles de millones de años. Por ejemplo, una búsqueda de sistemas extremos, con tasas de formación estelar mayores de $5000 M_{\odot}/\text{año}$, necesitaría un censo de más de 100 grados cuadrados antes de que se puedan deducir resultados estadísticamente significativos sobre este modo de formación galáctica.

2.2.2 Resolución del fondo de radiación del infrarrojo lejano al milimétrico

La emisión integrada de las galaxias fuertemente oscurecidas tiene su pico a $\sim 230 \mu\text{m}$ y contribuye aproximadamente con un 50% al fondo de radiación extragaláctico desde las ondas de radio a los rayos X. Se trata de una componente que debe resolverse y entenderse. Es ilustrativo mencionar que hasta el momento se ha cartografiado menos de un grado cuadrado con la resolución necesaria para empezar a resolver la composición del fondo de radiación mencionado. Por ejemplo, sólo los mapas submilimétricos más profundos de SCUBA, con ruidos de $\sim 0.5 \text{ mJy}$ a

850 μm , resuelven en galaxias individuales alrededor de $\geq 30\%$ del fondo a 850 μm , pero cubren menos de 100 min de arco cuadrados. Además, la extrapolación de las densidades de fuentes medidas por SCUBA y MAMBO, a longitudes de onda más corta, predicen que estas fuentes contribuyen con menos de 15% al fondo infrarrojo lejano, que tiene su máximo a 230 μm , mientras que los censos más grandes de alrededor de $\sim 2\,000$ minutos de arco cuadrados y más superficiales, con ruidos de ~ 2.5 mJy a 850 μm , sólo logran identificar un porcentaje apenas significativo de este fondo.⁵

El GTM será el telescopio de mayor apertura efectiva que opere a 1 mm y tendrá un límite de confusión, por fuentes extragalácticas, extremadamente bajo. Con AZTEC, la primera cámara bolométrica del GTM, se podrá resolver todo el fondo milimétrico en galaxias individuales. En la figura 2.5 se indican las sensibilidades requeridas, las áreas de los censos y el fondo correspondiente que resolverán.

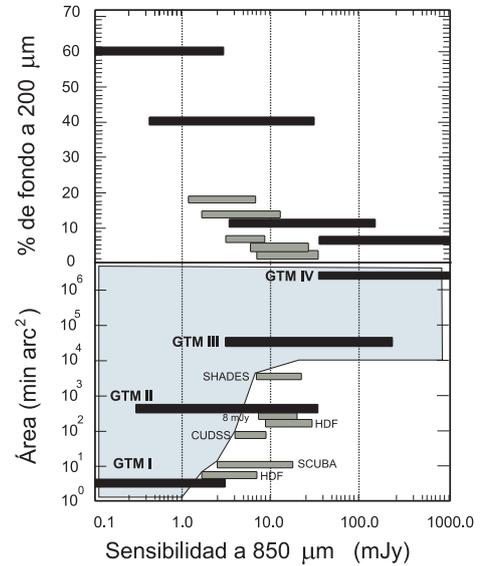


FIGURA 2.5. Censos cosmológicos planeados con el GTM. Se prevé efectuar una serie de censos embebidos, desde los muy profundos sobre un área pequeña, a los muy amplios pero bastante superficiales. La fracción correspondiente del fondo infrarrojo lejano resuelto se ilustra en el recuadro superior.⁵

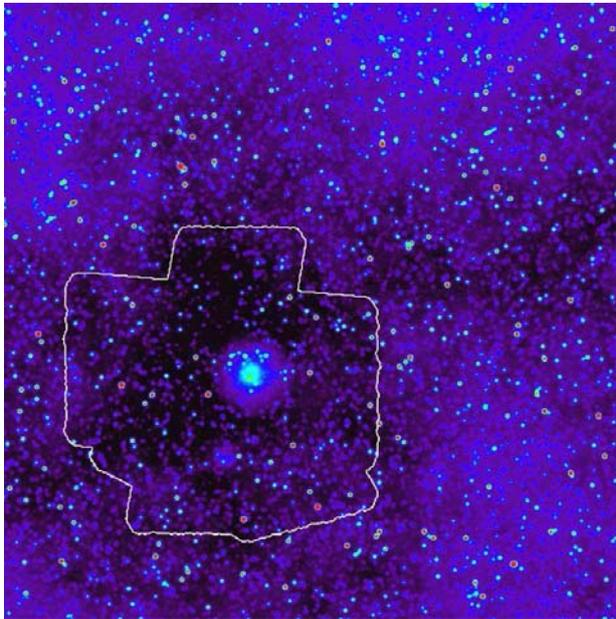


FIGURA 2.6. Simulación de la emisión de fuentes extragalácticas puntuales a 1.1 mm en un área de 0.5×0.5 grados cuadrados. La imagen incluye el incremento espectral producido por el efecto térmico Sunyaev-Zel'dovich en el cúmulo situado cerca del centro de la imagen (la fuente extendida con centro azul cielo), y el efecto del polvo de los cirros galácticos, cuya ausencia se pone de manifiesto en las zonas de la imagen con fondo oscuro. En una integración de 2 horas con AZTEC se podrían detectar más de 100 galaxias con fuertes brotes de formación estelar, como las encerradas en la región delimitada por la línea continua blanca y con apariencia puntual.¹

2.2.3 Medida de la distribución de corrimientos al rojo de galaxias oscuras

Las propiedades de agrupamiento y la densidad superficial de fuentes milimétricas, y su contribución al fondo extragaláctico, son sólo una parte de la información necesaria para comprender las propiedades evolutivas de esta población de galaxias. Necesitamos, también, medir con precisión sus corrimientos al rojo. El medio interestelar fuertemente contaminado por polvo hace difícil la identificación, sin ambigüedad, de las contrapartidas visibles e infrarrojas de estas galaxias. Por lo tanto, en los últimos años se ha desarrollado un gran esfuerzo para determinar con qué precisión las distribuciones espectrales de energía, en el intervalo que va desde el infrarrojo medio hasta el radio, pueden predecir el corrimiento al rojo al que se encuentran las galaxias.⁶ También se han encontrado corrimientos al rojo espectroscópicos para una fracción de galaxias milimétricas con contrapartidas en radio, ya que la interferometría en radio ayuda a refinar las posiciones de las fuentes y a identificar las contrapartidas ópticas e infrarrojas que pueden explorarse espectroscópicamente.⁷ La distribución de corrimientos al rojo fotométricos y espectroscópicos^{7,8} de galaxias milimétricas brillantes indica que al menos $\sim 60\%$ se encuentran entre $z = 1.8$ y 3.5 . Si se toma en cuenta la pequeña fracción ($\lesssim 10\%$) del fondo milimétrico que se explica por fuentes brillantes, es evidente que necesitamos algún otro método

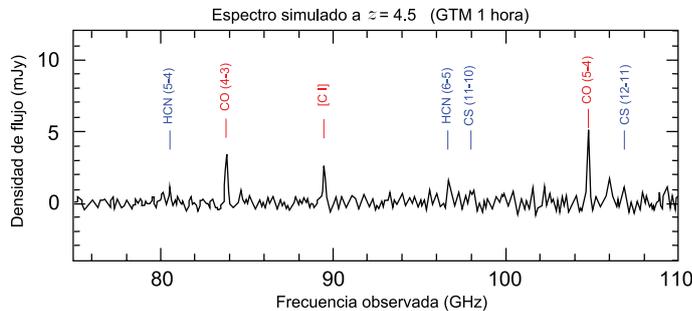


FIGURA 2.7. Espectro simulado de una galaxia milimétrica a $z = 4.5$ tras una hora de integración con el receptor de búsqueda de corrimientos al rojo del GTM, suponiendo una temperatura de 100 K. La densidad de flujo de las líneas de CO está basada en las intensidades medidas en el objeto cuasi estelar BRI 1335–10417 a $z = 4.4$. El brillo de las otras líneas está basado en el promedio de los cocientes de líneas observados en varias galaxias infrarrojas luminosas del Universo local. [M. Yun, University of Massachusetts Amherst].

para determinar los corrimientos al rojo de la población milimétrica que domina la emisión del fondo extragaláctico.

Las propiedades únicas del GTM y su instrumentación nos ofrecen una solución de frontera al problema de la medida de corrimientos al rojo. Se ha demostrado que las galaxias milimétricas polvosas también contienen grandes reservas de gas molecular,⁹ con masas de 10^{10} a $10^{11} M_{\odot}$, que alimentan la formación estelar. Dadas estas masas, el telescopio tendrá la suficiente sensibilidad como para buscar a ciegas las transiciones rotacionales del monóxido de carbono (CO) en las galaxias identificadas en los censos.

Para desarrollar tal búsqueda, el GTM contará con un receptor de banda ancha que operará en la ventana de 90 GHz. Con una banda instantánea de 36 GHz, este receptor buscará líneas de CO corridas al rojo. Puesto que la separación entre las líneas de CO en reposo es de 115.27 GHz, la separación observada será igual a esta cantidad dividida por $(1 + z)$, y su detección dará una medida inequívoca de la distancia a las fuentes milimétricas, sin la necesidad de buscar las contrapartidas en radio, el visible y el infrarrojo. Suponiendo que el telescopio tenga la suficiente sensibilidad como para detectar estas transiciones moleculares, se espera encontrar al menos una línea en la banda del receptor, para cualquier galaxia, con la excepción de aquellas que se encuentren entre $z = 0.4$ y 1.0 , donde ninguna de las líneas del CO están corridas lo suficiente como para entrar en la ventana del receptor. Por otra parte, las galaxias que se encuentren a estos bajos corrimientos al rojo deben ser fácilmente reconocibles por su brillo a otras frecuencias, y por la emisión molecular de otras especies. La detección de una sola línea de CO no es suficiente para determinar el corrimiento al rojo, pero ayuda a constreñir la búsqueda de una segunda línea de CO. Alternativamente, para $z > 3.2$ tendremos o bien dos líneas de CO o una línea de CO y la línea de C I, y por lo tanto podremos determinar el corrimiento al rojo con una sola observación del GTM.

La espectroscopía de CO de fuentes individuales, acoplada a la distancia angular entre las fuentes censadas por el GTM, permitirá medir el agrupamiento espacial de las galaxias luminosas con brotes de formación estelar, sobre un gran intervalo de corrimientos al rojo y épocas cósmicas. Después de determinar el corrimiento al rojo de las galaxias, el GTM podrá usar sus receptores de banda más angosta para observar con mayor resolución espectral los perfiles de línea, y así derivar la velocidad de rotación del gas y, a partir de ésta, la masa dinámica. Los resultados condicionarán los modelos de formación de galaxias masivas por medio de las cotas impuestas sobre la historia evolutiva de formación estelar de las galaxias.

2.3 Núcleos activos de galaxias a alto corrimiento al rojo

Los núcleos activos de galaxias más brillantes se manifiestan como radiofuentes luminosas u objetos cuasi estelares a cualquier corrimiento al rojo. En muchos casos, sus galaxias anfitrionas contienen grandes cantidades de gas molecular y polvo.¹⁰ Por lo tanto, son excelentes ejemplos de galaxias en las que simultáneamente se

advierte actividad por acrecentamiento de hoyos negros y por las altas tasas de formación estelar nuclear o circunnuclear.

Las imágenes visibles e infrarrojas de núcleos activos brillantes a bajo corrimiento al rojo ($z \lesssim 0.3$) demuestran que sus galaxias anfitrionas son elípticas masivas,¹¹ aunque a alto z no hay suficiente resolución para confirmar la morfología de las galaxias anfitrionas, la luminosidad visible e infrarroja también es consistente con la de las galaxias elípticas de primer rango.¹²

Tanto las galaxias activas como las inactivas se ajustan a una estrecha correlación entre la masa contenida por su componente esferoidal y la masa de su hoyo negro supermasivo central.¹³ Este hecho apoya el concepto de que todas las galaxias, incluida la Vía Láctea, han experimentado una fase de actividad nuclear en algún momento de su evolución, posiblemente asociada con una época virulenta de formación estelar. Por lo tanto, las galaxias anfitrionas de los núcleos activos brillantes ofrecen la oportunidad de estudiar la conexión entre la formación y la evolución de los hoyos negros y la formación y evolución de las galaxias elípticas o, de forma más general, de los esferoides galácticos.

Con el GTM podremos estudiar la emisión sincrotrón no térmica de cuasares fuertemente radioemisores, radiogalaxias de espectro plano y blazares, y también la radiación térmica del polvo calentado por la formación estelar y el contenido molecular de las galaxias anfitrionas de los cuasares débilmente radioemisores y radiogalaxias de espectro cuya pendiente es grande. Ya que $\sim 90\%$ de los núcleos activos de galaxias son débilmente radioemisores, el telescopio concentrará su empeño observacional en caracterizar el gas y el polvo de sus galaxias anfitrionas. Debido a la alta sensibilidad de detección de fuentes puntuales, y su alta velocidad de cartografía, se espera que los censos del GTM se dividan en dos programas: 1] fotometría y espectroscopía de una muestra no sesgada de unos 3 000 núcleos activos de galaxias a todos los corrimientos al rojo, y 2] cartografía de los entornos de los núcleos activos a $1 \lesssim z \lesssim 7$.

2.3.1 Censos de la emisión de continuo y la emisión molecular

Las observaciones milimétricas y submilimétricas realizadas hasta la fecha en núcleos activos a $2 \lesssim z \lesssim 5$ han demostrado que las galaxias que los albergan son jóvenes, masivas y químicamente enriquecidas, habiendo generado $\sim 10^9 M_{\odot}$ de polvo

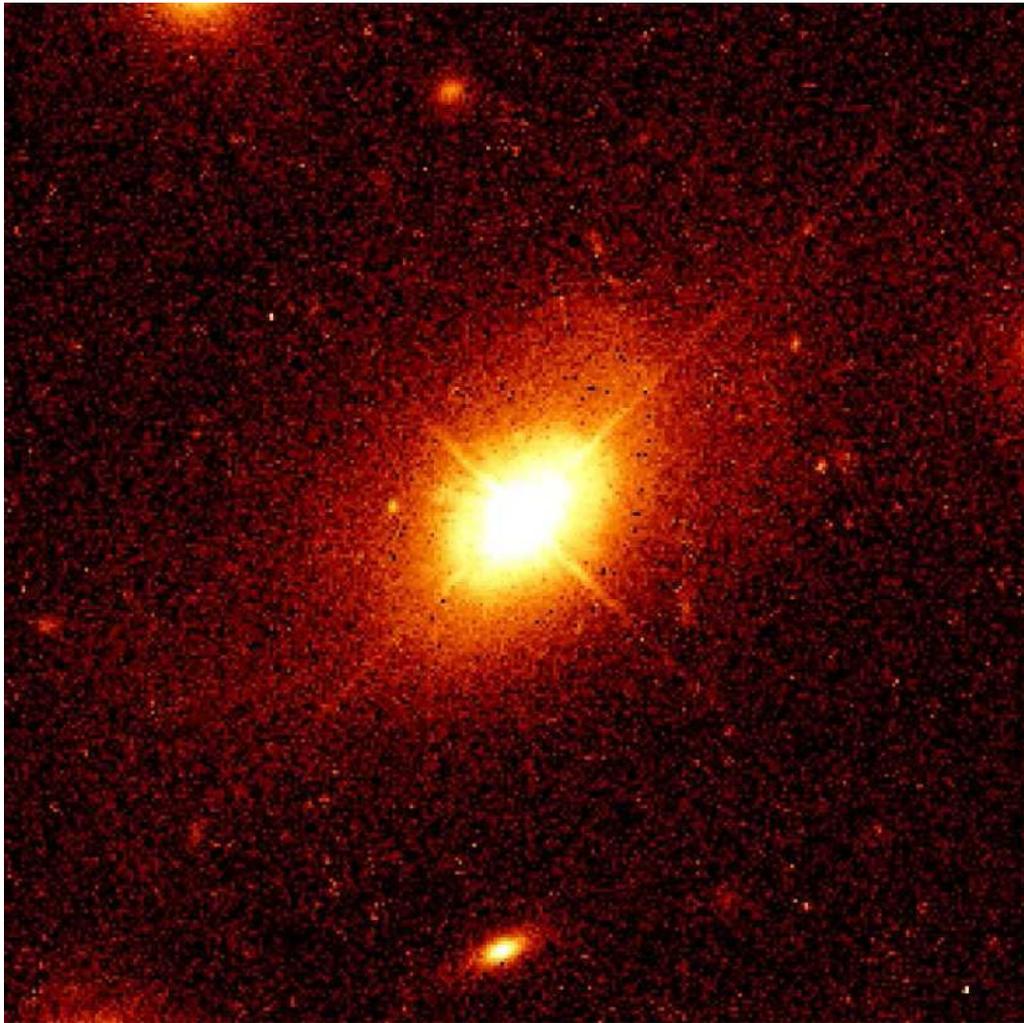


FIGURA 2.8. Imagen tomada con el telescopio espacial Hubble de un cuasar a bajo z . [J. Bachall, IAS, M. Disney, University of Wales y NASA].

en un periodo que no excede uno o dos mil millones de años.¹⁴ El brillo de la emisión térmica implica tasas de formación estelar superiores a las $1000 M_{\odot}/\text{año}$. A $z \geq 6$ se ha establecido la presencia de masas similares en unos cuantos sistemas.¹⁵ A pesar de estos avances, los tiempos de exposición que se necesitan para garantizar detecciones con los telescopios actuales limitan fuertemente las muestras de las que se dispone, y ya se han encontrado inconsistencias significativas entre los

resultados obtenidos para las poblaciones de radiogalaxias y de cuasares débilmente radioemisores.¹⁶ Dadas las limitaciones en las muestras, todavía no es posible trazar la evolución de la función de masa de polvo de cuasares y radiogalaxias.

El GTM, en combinación con los instrumentos del continuo AZTEC y SPEED, permitirá la detección de masas más de 50 veces menores que las encontradas hasta el momento para grandes muestras de núcleos activos de galaxias. Por ejemplo, podrá comparar la evolución de la masa de polvo en submuestras de cuasares seleccionados por su luminosidad en rayos X o en el visible, tengan o no detecciones en el infrarrojo lejano, con cuasares débilmente radioemisores y fuentes fuertemente radioemisoras de espectro cuya pendiente es grande. Todas estas muestras se compararán a su vez con muestras de control de galaxias elípticas pasivas e inactivas o galaxias espirales del Universo local. Dado el vasto espacio de corrimientos al rojo y potencias de actividad medidas a frecuencias de rayos X, visibles o de radio, será posible comparar la evolución de las propiedades milimétricas de un número significativo de núcleos con tasas de acrecentamiento similares, minimizando los sesgos inducidos por el calentamiento de los granos de polvo, debido a la radiación proveniente del núcleo activo. De forma inversa, también será posible estudiar la misma muestra para considerar la dependencia de la luminosidad milimétrica con la radiación no térmica de acrecentamiento en diferentes épocas cósmicas, para así minimizar el impacto que la evolución pueda tener en cada una de las submuestras.

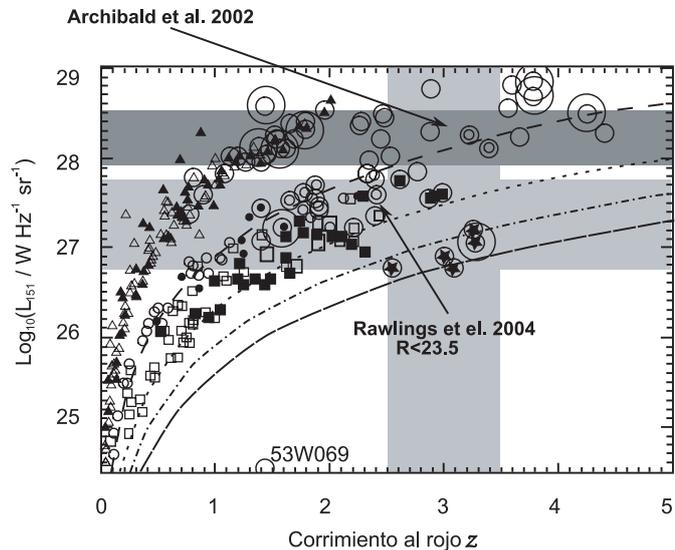


FIGURA 2.9. Luminosidad radio a 151 MHz como función del corrimiento al rojo de varios censos de radiogalaxias y cuasares. Las regiones sombreadas ilustran la posibilidad de seleccionar objetos en intervalos de luminosidad o corrimiento al rojo para estudiarlos con el GTM. [D.H. Hughes, INAOE, adaptada de Archibald *et al.* (2002) y Rawlings *et al.* (2004)¹⁷].

Se realizarán también estudios complementarios del contenido de gas molecular con la cámara SEQUOIA, con el buscador de corrimientos al rojo y con el receptor de 1 mm. Los datos obtenidos medirán las propiedades físicas del medio interestelar de las muestras de núcleos activos de galaxias, como la masa de gas molecular, la temperatura y densidad del gas y la masa dinámica, entre otras.

Las futuras observaciones del GTM se emplazarán en el contexto del esquema unificado de núcleos activos de galaxias, que argumenta que no existen diferencias intrínsecas entre las propiedades de los núcleos fuerte y débilmente radioemisores, excepto aquellas introducidas por un efecto de orientación, como el producido por la atenuación asimétrica. La ventaja de realizar observaciones con el GTM consiste en que las ondas milimétricas no son sensibles a los efectos atenuantes del polvo de las galaxias anfitrionas. Por lo tanto, dichas observaciones no estarán afectadas por la orientación de las fuentes, y se podrán construir muestras detalladas de núcleos activos que presten evidencia o refuten el paradigma unificado.

2.3.2 El entorno de los núcleos activos de galaxias en ondas milimétricas

La detección de un agrupamiento importante de galaxias masivas es una de las predicciones del escenario jerárquico de la formación de estructuras. La distribución de las galaxias elípticas masivas a alto corrimiento al rojo, que se cree traza la distribución subyacente de materia oscura, ofrece una manera de cartografiar estas sobredensidades. De ahí que el propósito de muchos de los censos extragalácticos milimétricos y submilimétricos se centre en encontrar señales inequívocas de las fases intensas y cortas de formación estelar, mucho mayores que cientos de masas solares por año, asociadas con la constitución de las galaxias elípticas y sus progenitores.

En vez de realizar censos sobre regiones sin sesgos, el GTM podrá atacar campos en los que ya se espera encontrar un pico de sobredensidad en la distribución de materia subyacente. Los núcleos activos de galaxias de alto z marcan algunos de estos campos especiales donde ya se ha encontrado un exceso de galaxias de corte Lyman y fuentes submilimétricas.¹⁸ La mayor parte de las galaxias masivas del Universo local son elípticas, y se encuentran principalmente en los cúmulos ricos de galaxias. Puesto que las galaxias elípticas albergan todas las fuentes fuertemente radioemisoras que conocemos, las radiogalaxias de alto z nos ofrecen la oportunidad de estudiar tanto la formación de sus galaxias elípticas, como las de sus entornos.

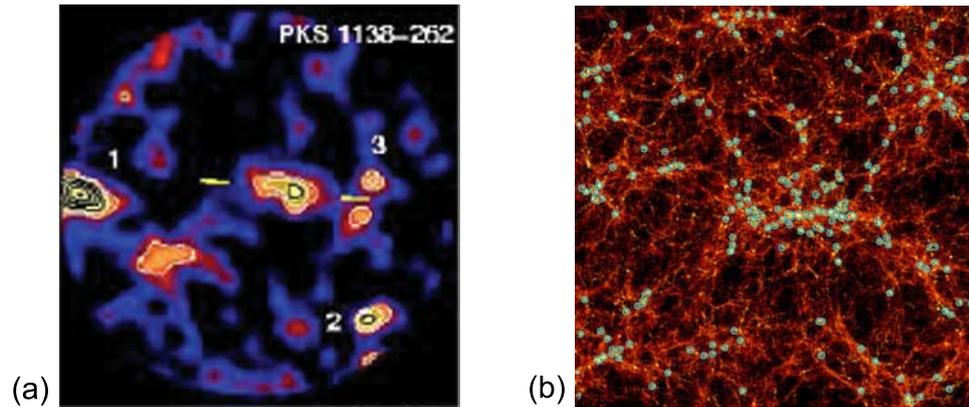


FIGURA 2.10. (a) Estructura en torno a la radiogalaxia PKS1138-262 encontrada en un campo SCUBA¹⁸ de $\sim 2.3'$ de diámetro. Las galaxias detectadas parecen estar alineadas con la dirección del radiochorro de la radiogalaxia, marcado por las dos líneas amarillas. (b) Simulación de un campo de $30' \times 30'$ alrededor del progenitor de un cúmulo rico de galaxias a $z = 3$ [Governato *et al.* ©Nature Publishing Group¹⁹]. Los círculos marcan las posiciones de los halos de las galaxias más masivas, y corresponden aproximadamente a 60% del campo de SCUBA de la imagen (a). Los halos que se encuentran repartidos en el campo terminan dentro del radio virial del cúmulo central a $z = 0$. El GTM será capaz de cartografiar el área completa de un progenitor de cúmulo como éste con la cámara AZTEC, y trazar las estructuras filamentosas del protocúmulo a gran escala.

También se espera que los cuasares débilmente radioemisores más luminosos se encuentren en galaxias elípticas masivas.

2.4 Detección de las anisotropías del fondo de radiación cósmica de microondas

El Cosmic Background Explorer (COBE) demostró que este fondo es un cuerpo negro casi perfecto a 2.725 K, con fluctuaciones menores que los $80 \mu\text{K}$ sobre todo el cielo.²⁰ Esta radiación es luz primordial proveniente de la superficie de la última dispersión, la época en la cual el Universo se enfrió por debajo de la temperatura de ionización del hidrógeno, aproximadamente 380 000 años después de la Gran Explosión. Conforme los iones se recombinaron con los electrones del plasma caliente para formar átomos neutros, la radiación se desacopló de la materia y los fotones empezaron a viajar libremente, hasta que algunos de ellos fueron interceptados por los experimentos del fondo de radiación cósmica unos 13 000 millones de años más tarde.

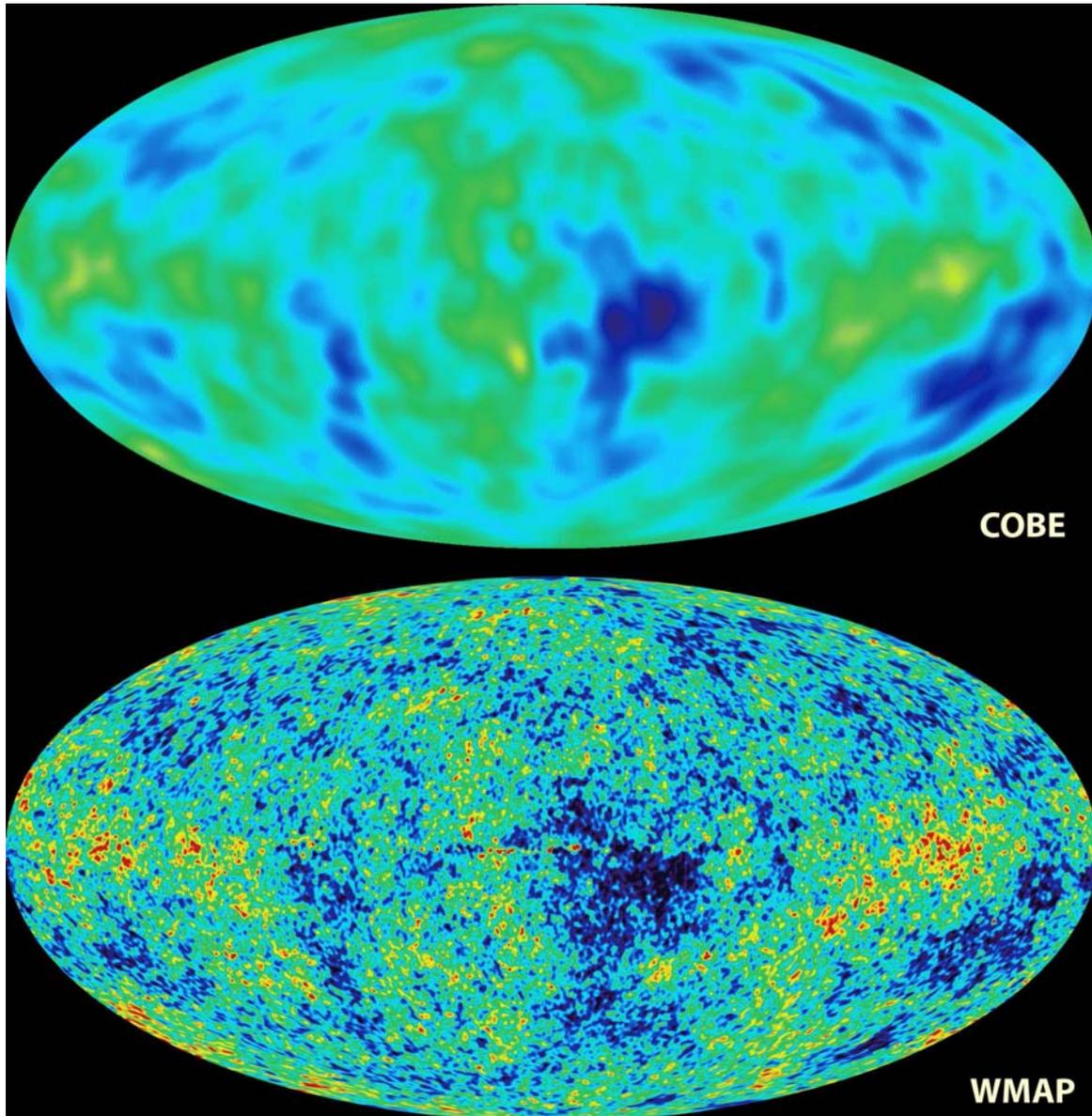
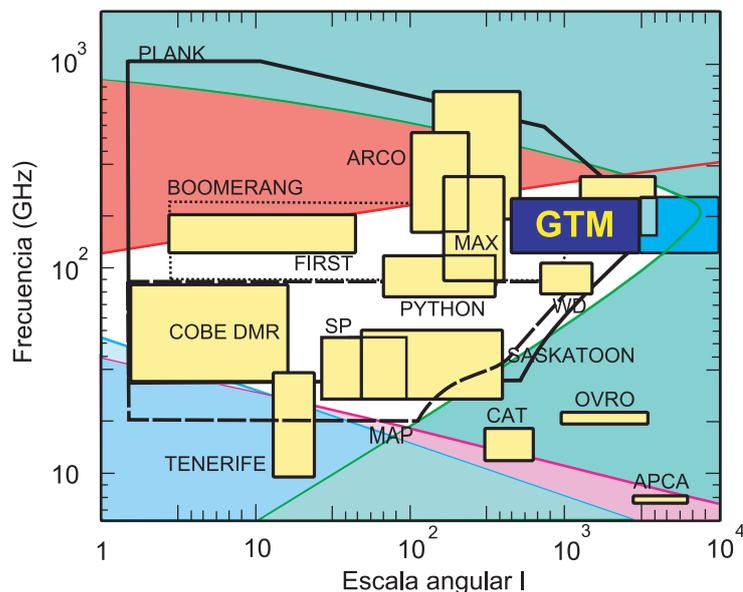


FIGURA 2.11. Comparación de los experimentos COBE y WMAP. Imagen de todo el cielo del Universo en su infancia, unos 380 000 años después de la Gran Explosión. La misión de la NASA COBE detectó por primera vez pequeñas fluctuaciones de temperatura, lo que representó un hito en la historia de la astronomía. La imagen de WMAP tiene mucha mejor resolución y con base en estos datos los parámetros cosmológicos se han constreñido recientemente hasta niveles sin precedentes. [Grupo científico de NASA/WMAP].

FIGURA 2.12. Escala angular y frecuencia de operación de los telescopios usados en el estudio del fondo de radiación cósmica. La región azul oscura representa los límites prácticos impuestos por la primera generación de instrumentos del GTM. La región azul transparente indica el espacio de parámetros disponible para la segunda generación de cámaras bolométricas con más de 1000 píxeles, dada la resolución espacial impuesta por la apertura de 50 m.²¹



Las fluctuaciones primordiales contienen información sobre las condiciones del Universo en el momento del desacoplamiento. Existen además fluctuaciones secundarias que se crean cuando los fotones se dispersan al interactuar con los potenciales gravitacionales y las fuentes ionizantes en su camino hacia los observadores actuales. Se han realizado medidas de estas fluctuaciones en escalas grandes y pequeñas con telescopios a bordo de satélites y globos como COBE, WMAP, Maxima y Boomerang, y con interferómetros terrestres como CBI y ACBAR. El GTM puede llenar el hueco que existe entre las observaciones de estas dos clases de experimentos, debido a la gran resolución de 6 a 15 seg de arco entre 1.1 y 3 mm, y su gran sensibilidad de brillo superficial, como se muestra en la figura 2.12. Se espera que estas prestaciones del GTM se vean aún más reforzadas por la siguiente generación de cámaras de plano focal con un campo de visión instantáneo.

2.4.1 Fluctuaciones primordiales del fondo de radiación cósmica

La teoría de la inflación postula que el plasma primordial tenía inhomogeneidades de densidad y presión que crecieron de acuerdo con el factor de escala del Universo. Estas ondas acústicas produjeron pequeñas variaciones de temperatura que

se observaron más tarde como fluctuaciones primordiales del fondo de radiación cósmica congeladas sobre la superficie de última dispersión, en la época del desacoplamiento. Mientras que el satélite WMAP²² ha medido de forma precisa tales fluctuaciones en todo el cielo hasta escalas angulares $l \sim 600$ (o 0.2 grados), el GTM podrá medir las fluctuaciones en un intervalo amplio de pequeños factores de escala $300 < l < 3000$ (de 0.4 a 0.04 grados) en un plazo razonable. Los resultados mejorarán la precisión de los datos de alto l proveniente de los interferómetros ACBAR y CBI, ya que el GTM podrá cartografiar áreas mayores del cielo. Las escalas que se superponen a las medidas de WMAP proporcionan una importante calibración. La señal de más alta frecuencia acústica y la pendiente del corte de alto l se medirán de forma precisa en este régimen, y permitirán constreñir los parámetros cosmológicos. Las escalas pequeñas del espectro de potencias pueden usarse para evaluar la forma y la naturaleza gaussiana de las fluctuaciones de densidad, que son una prueba de la teoría de la inflación, y también pueden estimar la época en la que se produjo la reionización del Universo temprano por la formación de las primeras estrellas y núcleos activos de galaxias.

2.4.2 Fluctuaciones secundarias del fondo de radiación cósmica debidas al efecto Sunyaev-Zel'dovich

Hay un gran número de mecanismos que se pueden utilizar para producir dispersión de los fotones primordiales del fondo de radiación cósmica, incluyendo el amortiguamiento por plasma, los potenciales gravitatorios no estacionarios como los producidos en los flujos de gran escala, o la amplificación gravitacional. La fuente dominante de fluctuaciones secundarias del fondo de radiación es la ionización local de cúmulos de galaxias, que será detectada por el GTM.

El plasma del medio intergaláctico, dentro de los cúmulos de galaxias, interactúa con los fotones del fondo de radiación mediante la dispersión inversa de Compton, por lo cual los electrones calientes producen dispersión de fotones de baja energía hacia energías mayores. Este efecto térmico Sunyaev-Zel'dovich (S-Z) distorsiona el espectro milimétrico en la vecindad de los cúmulos, produciendo un decremento máximo sobre el fondo de radiación a 2.3 mm, un incremento máximo a 0.85 mm y ninguna señal a 1.4 mm. El GTM podrá explotar este efecto para identificar cúmulos distantes y utilizar su resolución espacial para separarlos de galaxias cuasi puntuales y de los cirros galácticos con espectro similar.²³ La amplitud del efecto S-Z está

gobernada por el parámetro de ionización de Compton y por la temperatura de los electrones. Las medidas del efecto S-Z, que el GTM tomará en ondas milimétricas, se combinarán con observaciones en rayos X para estimar la masa de los cúmulos, que es un parámetro físico relevante. La cartografía y espectroscopía visible e infrarroja de las galaxias asociadas con los cúmulos darán los corrimientos al rojo y las dispersiones de velocidades. Esta información impondrá cotas al crecimiento de las estructuras.

Además, ya que el Universo es transparente en ondas milimétricas, y la intensidad del efecto S-Z es simplemente la distorsión del fondo de radiación cósmica, ésta es independiente del corrimiento al rojo al que ocurre, y los censos S-Z no tienen sesgos de distancia. La búsqueda del efecto S-Z será indispensable para estudiar la formación y evolución de las grandes estructuras en cualquier época.

2.5 Estallidos de rayos gamma

Los estallidos de rayos gamma fueron descubiertos a principio de los años setenta por satélites militares que estudiaban el efecto de las explosiones nucleares en la atmósfera terrestre. Sólo después de que se estableció el origen extraterrestre de estos sucesos, el descubrimiento se hizo público.²⁴ Se pueden observar con instrumentos que detectan fotones de alta energía (rayos X y rayos gamma) operados desde satélites para evitar la absorción de la atmósfera terrestre. Los estallidos de rayos gamma están repartidos sin patrón alguno en el cielo y deslumbran cualquier otra fuente celeste de alta energía por periodos cortos: su duración puede ser tan corta como una décima de segundo, y tan larga como unos pocos minutos. Con la excepción de los eventos llamados repetidores blandos de rayos gamma, dichos estallidos no ocurren dos veces en la misma posición del cielo y, puesto que hasta muy recientemente los telescopios que los podían detectar tenían una resolución espacial pobre, su origen ha sido un gran misterio por más de dos décadas.

El instrumento BATSE, del Compton Gamma-Ray Observatory, se diseñó para detectar un gran número de estallidos de rayos gamma con la idea de buscar pistas sobre su origen. El BATSE detectó aproximadamente un estallido al día, mostrando una distribución uniforme en el cielo, lo que implicaba un origen extragaláctico.²⁵ La fuente de energía que originalmente se infirió para estos objetos era 100 veces más luminosa que la de una supernova. Sin embargo, más recientemente se han

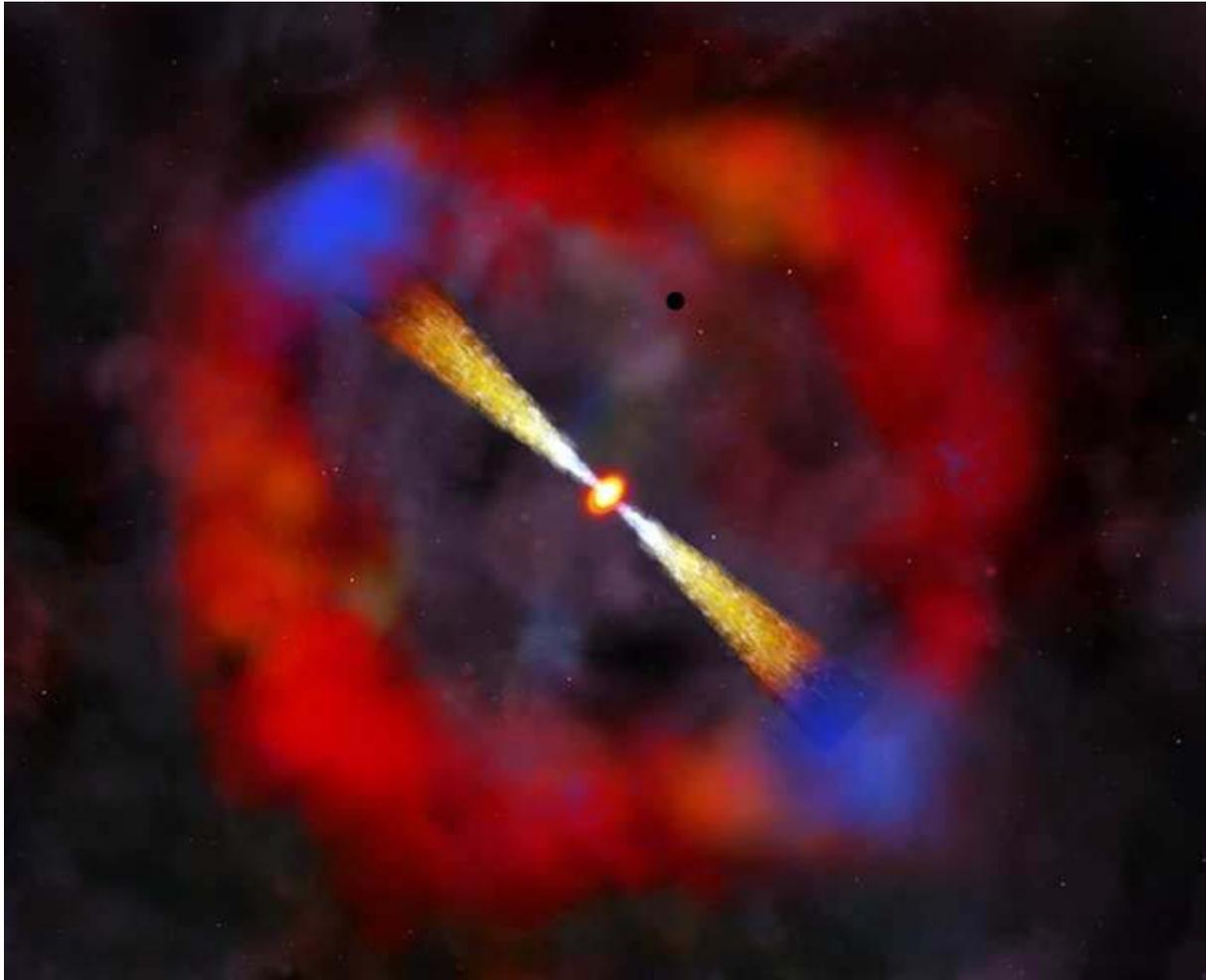
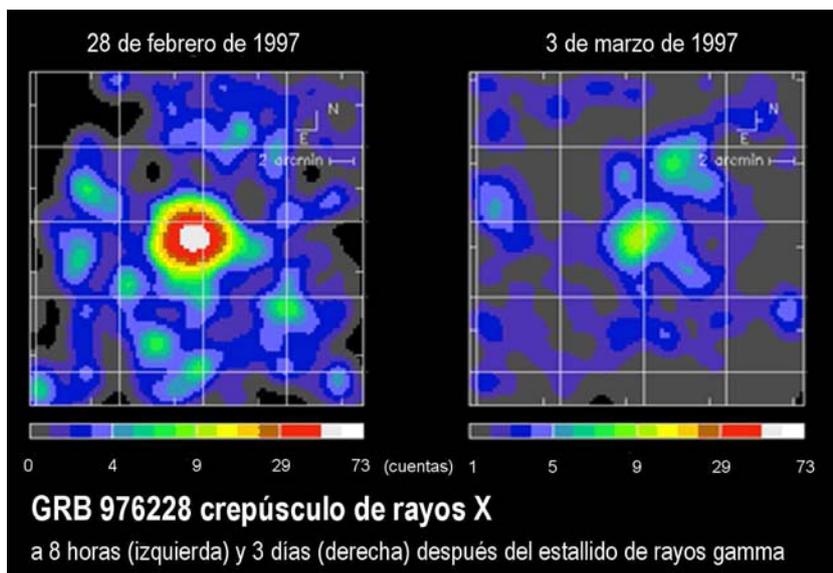


FIGURA 2.13. Concepción artística de un estallido de rayos gamma, donde los chorros de partículas de alta energía son emitidos por un hoyo negro en el centro del caparazón de una supernova. [M. Weiss, CXC].

recabado indicios que señalan que los estallidos de rayos gamma son explosiones en las que se producen eyecciones de materia en chorros altamente colimados, con velocidades cercanas a la de la luz.²⁶ Por lo tanto, si la materia se eyecta en haces colimados, la energía total de la explosión es mucho más pequeña que si la materia se expulsara isotrópicamente.

A finales de 1990, la misión italiana de rayos X BeppoSAX mostró que los estallidos gamma de larga duración, los que duran más de dos segundos, se acompañaban

FIGURA 2.14. El primer crepúsculo en rayos X detectado por BeppoSAX, GRB 976228. El cuadro de la izquierda muestra el crepúsculo 8 horas después de que el estallido de rayos gamma fuera detectado, y el cuadro de la derecha muestra el crepúsculo 3 días más tarde. Las escalas espaciales y de brillo son las mismas para los dos cuadros. [E. Costa *et al.* ©Nature Publishing Group].²⁷



de emisión en rayos X de larga duración, aunque de más baja intensidad.²⁷ Estos crepúsculos de rayos X duran varias horas, e incluso unos pocos días, lo que permite la localización del estallido de rayos gamma en el cielo de forma más precisa a través de telescopios cartográficos de rayos X de baja energía. Las posiciones refinadas permitieron observaciones de seguimiento más detalladas con telescopios ópticos y radiotelescopios, lo que mostró que estos estallidos ocurrían en galaxias normales hasta distancias muy altas.²⁸ Se observó que unos pocos estallidos de rayos gamma tomaban características de supernova, probando que éstos son el inicio de uno de los tipos de supernova.²⁹ Hoy día se cree que la mayoría de las supernovas explotan isotrópicamente, eyectando materia de la estrella progenitora en todas las direcciones a velocidades de unos 10 000 km/s, mientras que los estallidos de rayos gamma eyectan la materia unas 30 veces más rápidamente a gran distancia en dos haces simétricos. Lo anterior es consistente con el hecho de que los estallidos de rayos gamma se hayan detectado a grandes distancias. De hecho, se podrían convertir en sondas del Universo temprano, ya que se pueden detectar a grandes distancias si los observadores están alineados con el haz del estallido.

Puesto que las supernovas y los estallidos de rayos gamma marcan la muerte de estrellas masivas, sus posiciones dan información sobre la situación de regiones de formación estelar, ya que las estrellas masivas tienen vidas unas 1 000 veces más

cortas que estrellas como el Sol. Los estallidos de rayos gamma nos podrían llevar a los primeros sitios donde ocurrió la formación estelar en el Universo. Una vez que la posición del estallido se conoce, los telescopios más poderosos de la Tierra pueden observar y estudiar sus galaxias anfitrionas. En vista de que la mayor parte de la formación estelar está embebida en entornos polvosos, se trata de uno de los objetivos prioritarios del GTM.

Las cuestiones científicas que se quieren resolver sobre los progenitores de los estallidos de rayos gamma son la naturaleza de las galaxias anfitrionas y su utilización como trazadores de la formación estelar a alto z , ya que podrían ser detectados hasta $z \sim 15$. El GTM operará simultáneamente con dos misiones de alta energía, que detectarán y localizarán apropiadamente una gran muestra de estallidos de rayos gamma: Swift, que se lanzó en noviembre de 2004, y GLAST, que será lanzado en febrero de 2007. El campo de visión de estos observatorios espaciales cubre entre 10 y 20% del cielo, permitiendo descubrir en promedio un estallido cada dos o tres días. Swift y GLAST darán posiciones con precisiones de unos pocos minutos de arco, comparables con el campo de visión del GTM. Las detecciones marginales de galaxias anfitrionas de estallidos de rayos gamma en ondas milimétricas y submilimétricas con las que se cuenta hasta el momento ponen de manifiesto que el GTM será capaz de detectar decenas de galaxias anfitrionas al año, a un nivel de unos pocos mJy a 0.85 mm y 1.2 mm. Las observaciones con el telescopio de 30 m del IRAM de GRB-991208 permitieron datar cuándo el material eyectado se volvió transparente a los fotones milimétricos, y se pudo seguir la rápida evolución del crepúsculo y constreñir los modelos existentes.³⁰ El GTM podrá obtener exposiciones más profundas de los crepúsculos de los estallidos de rayos gamma, permitiendo entender las interacciones del material eyectado de alta velocidad y su entorno local.

Referencias

- [1] Chapin, E.L. (2004), "Constraining the History of High-Redshift Dust-Enshrouded Star-Formation with Balloon-Borne and Ground-Based Sub-Millimetre Surveys", Tesis Doctoral, INAOE, México.
- [2] Smail, I. *et al.* (1997), "A Deep Sub-millimeter Survey of Lensing Clusters: A New Window on Galaxy Formation and Evolution", *Astrophys. J.* **490**, L5.

- [3] Hughes, D.H. *et al.* (1998), “High-redshift star formation in the Hubble Deep Field revealed by a submillimetre-wavelength survey”, *Nature* **394**, 241.
- [4] Hughes, D.H. y Aretxaga, I. (2005), “Understanding the History of Obscured Star Formation in the High-redshift with Coordinated GTC and LMT Surveys”, en “II International Workshop on Science with the GTC: Science with GTC 1st-light Instruments and the LMT”, A.M. Hidalgo-Gómez *et al.*, J.J. (eds.) *Rev. Mex. Astron. Astroph. (Ser. Conf.)* **24**, 144.
- [5] Adaptada de Hughes, D.H. *et al.* (2005), “Resolving the FIR-Submillimetre Extragalactic Background from Dome C, Antarctica”, en “Dome C Astronomy/Astrophysics Meeting”, *EAS Publ. Ser.*, en prensa.
- [6] *e.g.* Yun, M.S. y Carilli, C.L. (2002), “Radio-to-Far-Infrared Spectral Energy Distribution and Photometric Redshifts for Dusty Starburst Galaxies”, *Astrophys. J.* **568**, 88.
- [7] Chapman, S.C. *et al.* (2003), “A median redshift of 2.4 for galaxies bright at submillimetre wavelengths”, *Nature* **422**, 695.
- [8] Aretxaga, I. *et al.* (2003), “Breaking the ‘redshift deadlock’- II. The redshift distribution for the submillimetre population of galaxies”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **342**, 759.
- [9] Greve, T.R. *et al.* (2005), “An interferometric CO survey of luminous submillimetre galaxies”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **359**, 1165.
- [10] Hughes, D.H. *et al.* (1993), “Thermal Dust Emission from Quasars - Part One - Submillimetre Spectral Indices of Radio Quiet Quasars”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **263**, 607.
- [11] Dunlop, J.S. *et al.* (1993), “Infrared Imaging of the Host Galaxies of Radio-Loud and Radio-Quiet Quasars”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **264**, 455.
- [12] *e.g.* Aretxaga, I. *et al.* (1998), “Multicolour imaging of $z=2$ QSO hosts”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **296**, 643.
- [13] Gebhardt, K. *et al.* (2000), “Black Hole Mass Estimates from Reverberation Mapping and from Spatially Resolved Kinematics”, *Astrophys. J. Lett.* **543**, L5.

- [14] Archibald, E.N. *et al.* (2002), “Coupled spheroid and black hole formation, and the multifrequency detectability of active galactic nuclei and submillimeter sources”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **336**, 353.
- [15] Robson, I. *et al.* (2004), “Submillimetre observations of $z > 6$ quasars”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **351**, L29.
- [16] Priddey, R.S. *et al.* (2003), “The SCUBA Bright Quasar Survey (SBQS) - II. Unravelling the quasar epoch at submillimetre wavelengths”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **339**, 1183.
- [17] Rawlings, S. *et al.* (2004), “Submillimetre photometry of typical high-redshift radio quasars”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **351**, 696.
- [18] Stevens, J.A. *et al.* (2003), “Sub-mm Imaging of Distant Radio Galaxies: Witnessing the Formation of Massive Cluster Ellipticals”, *Nature* **425**, 264.
- [19] Governato, F. *et al.* (1998), “The seeds of rich galaxy clusters in the Universe”, *Nature* **392**, 359.
- [20] Smooth, G.F. *et al.* (1992), “Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps”, *Astrophys. J.* **396**, L1.
- [21] Montana, A. (2002), “Fluctuations and Anisotropies in the Cosmic Microwave Background”, Tesis de Maestría, INAOE, México.
- [22] Bennett, C.L. *et al.* (2003), “First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Preliminary Maps and Basic Results”, *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 1.
- [23] Aragón Calvo, M. A. (2002), “Simulations of the Sunyaev-Zel’dovich Effect, and their Application to Future Millimetre-Wavelength Experiments”, Tesis de Maestría, INAOE, México.
- [24] Klebesadel, R.W. *et al.* (1973), “Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin”, *Astrophys. J.* **182**, L85.
- [25] Briggs, M.S., *et al.* (1996), “BATSE Observations of the Large-Scale Isotropy of Gamma-Ray Bursts”, *Astrophys. J.* **495**, 40.

-
- [26] Rees, M.J. y Mészáros, P. (1992), “Relativistic fireballs - Energy conversion and time-scales”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **258**, 41.
- [27] Costa, E. *et al.* (1997), “Discovery of an X-ray afterglow associated with the gamma-ray burst of 28 February 1997”, *Nature* **387**, 783.
- [28] Kulkarni, S.R. *et al.* (1998), “Identification of a host galaxy at redshift $z = 3.42$ for the gamma-ray burst of 14 December 1997”, *Nature* **393**, 55.
- [29] Mészáros, P. (2003), “Gamma-ray bursts: The supernova connection”, *Nature* **423**, 809.
- [30] Galama, T.J. *et al.* (2000), “The Bright Gamma-Ray Burst 991208: Tight Constraints on Afterglow Models from Observations of the Early-Time Radio Evolution”, *Astrophys. J.* **541**, L45.

3. Las galaxias del Universo local

3.1 Introducción

EL UNIVERSO LOCAL proporciona un enlace vital entre la Vía Láctea y el Universo temprano y ofrece, además, una panorámica crucial de nuestra propia galaxia. La estructura espiral de la Vía Láctea es muy difícil de estudiar desde nuestra posición, inmersa en las partes externas del disco galáctico. Sin embargo, las galaxias cercanas se pueden observar con gran detalle, de manera que, a través de éstas, podemos estudiar los procesos que generan la estructura espiral de nuestra propia galaxia. Adicionalmente, entender el estado de evolución de los sistemas galácticos cercanos permite definir de forma más precisa los procesos que determinaron la evolución del Universo temprano.

3.2 Distribución del gas molecular

La distribución y abundancia de la materia interestelar densa contribuye, en gran medida, a determinar la morfología y evolución de las galaxias. Las estrellas se forman predominantemente en nubes moleculares gigantes, de 10 a 50 parsecs (pc) y masas de 10 000 a un millón de veces la masa del Sol. Las estrellas masivas que emergen de estas nubes moleculares emiten la mayor parte de la radiación de las galaxias, y son las responsables del enriquecimiento químico del medio interestelar. Las nubes gigantes están formadas predominantemente por hidrógeno molecular, que no radia eficientemente en las condiciones típicas del medio interestelar y, por lo tanto, es difícil de detectar. Esta es la razón por la que las nubes moleculares se estudian principalmente mediante trazadores de líneas moleculares como el CO

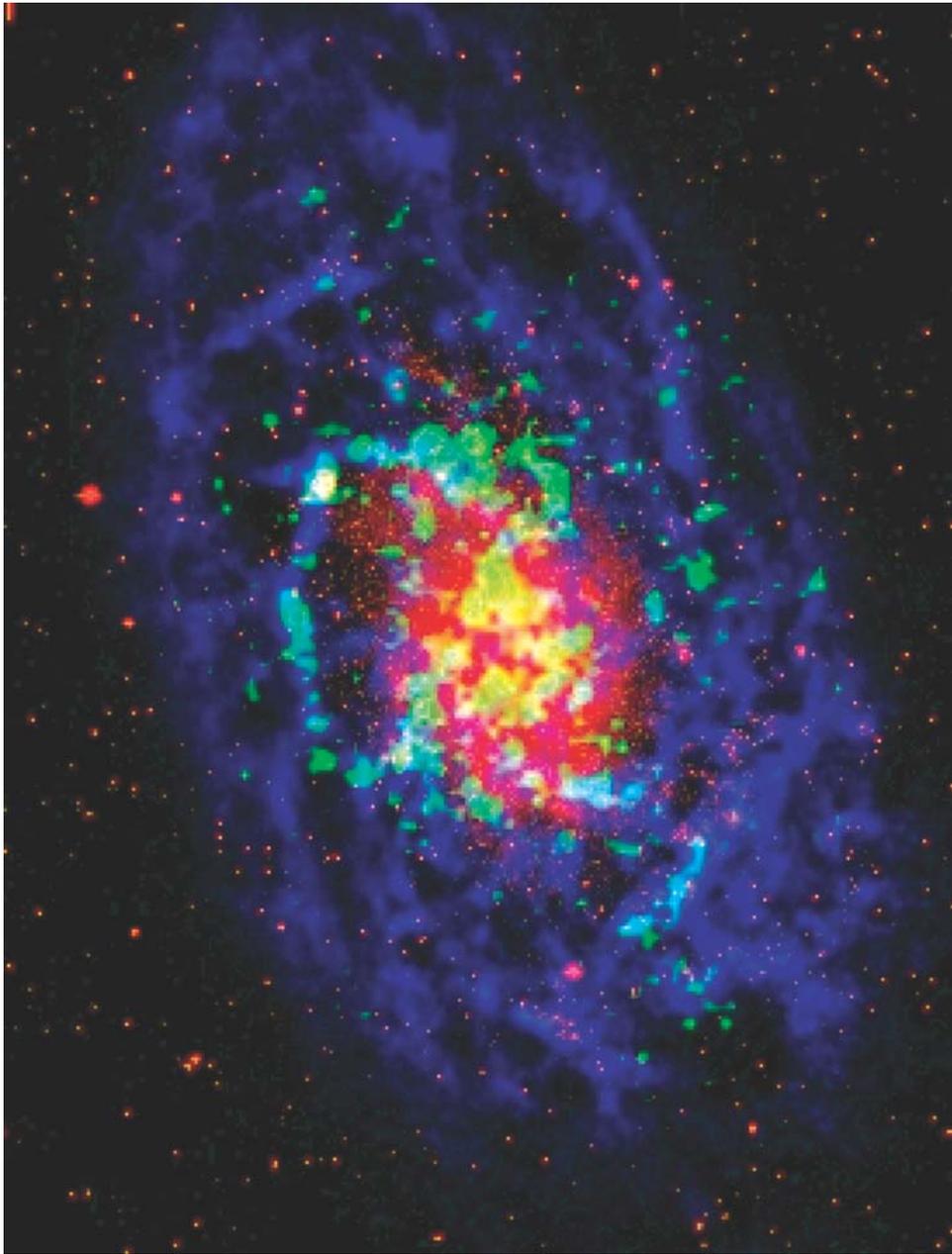


FIGURA 3.1. Imagen en color compuesto de M33, que muestra la emisión óptica en rojo, el hidrógeno neutro en azul, y el CO en verde. La emisión de CO ha sido trazada con la cámara SEQUOIA en el 14 m del FCRAO.¹

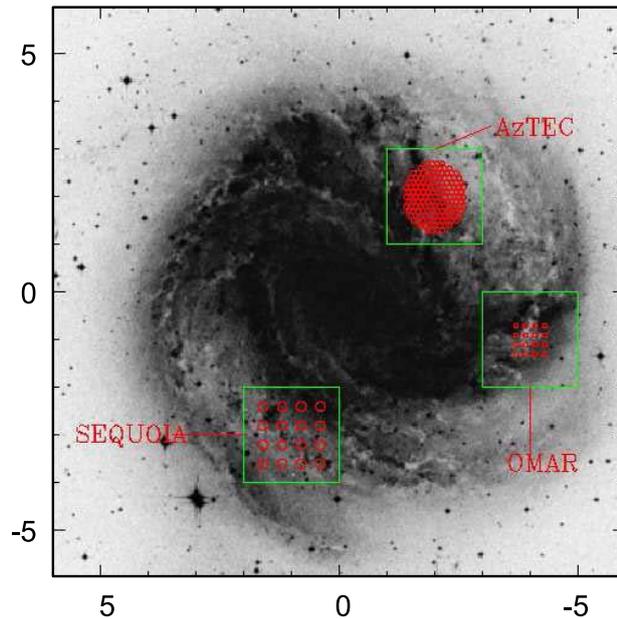


FIGURA 3.2. Imagen en el visible de M83, en la que se han superpuesto las huellas de los ensambles o matrices de receptores del GTM. El telescopio barrerá el campo para obtener imágenes completas de la galaxia. [Imagen: STSCI, AAO, ROE, UK-PPARC].

o mediante la emisión térmica del continuo emitido por los granos interestelares de polvo. El GTM está optimizado para estudiar el estado físico de la componente fría interestelar de las galaxias y para evaluar su importancia en los procesos de formación estelar.

La operación del GTM a altas frecuencias permitirá trazar la distribución del gas molecular y del polvo en las galaxias cercanas en las que se están formando estrellas en la actualidad, y también en las que la formación estelar empezará en un futuro cercano. Se realizarán, además, censos sin sesgos de las propiedades de los discos de las galaxias. Como ejemplo ilustrativo, la resolución angular del GTM corresponde a unos 20 pc a la distancia de la galaxia Andrómeda (M31) y a la de la galaxia Triángulo (M33), lo cual es suficiente para resolver el gas contenido en sus nubes moleculares. Del mismo modo, el GTM podrá localizar y medir la cinemática de las nubes densas de gas molecular en unas 100 galaxias espirales cercanas, e investigar los mecanismos de formación de las nubes moleculares y su disipación al pasar por los frentes de choque de los brazos espirales. Casi todos los instrumentos del GTM son cámaras multipíxel, diseñadas para realizar cartografía rápida, por lo que se podrá estudiar este conjunto extenso de galaxias de una manera eficiente, realizando una caracterización sólida, desde el punto de vista estadístico.

3.3 Inestabilidades y formación estelar

La coherencia espacial entre las estrellas calientes (estrellas OB) y las regiones de gas ionizado (regiones H II) en las galaxias es producto del mecanismo a gran escala que regula la formación estelar. Algunos estudios^{2,3} demuestran que la tasa de formación estelar de las galaxias está limitada, de manera fundamental, por la formación de las nubes moleculares de gas interestelar, desde un material inicialmente difuso. Tal paso evolutivo puede estar afectado por perturbaciones de presión, que llevan el material neutro caliente a una fase molecular fría y densa. Los agentes perturbadores incluyen las ondas espirales de densidad, originadas por la coalescencia entre galaxias, las inestabilidades de disco y los cascarones producidos por explosiones de supernovas en escalas intermedias. Con su gran capacidad de imagen, el GTM podrá definir las relaciones espaciales y cinemáticas entre la población de nubes moleculares y la componente de gas atómico trazada por el hidrógeno neutro (H I), que ya se ha estudiado mediante la transición de 21 cm. Estas relaciones pueden discriminar entre los posibles factores responsables del desarrollo de las nubes moleculares y la subsiguiente formación estelar de las galaxias.

Las galaxias con brotes violentos de formación estelar constituyen una clase de objetos en los que la tasa de formación estelar es muchas veces más eficiente que la encontrada en galaxias normales, como la Vía Láctea. Estos sistemas extremos, que se encuentran en el Universo local, son probablemente similares a los objetos hiperluminosos que se observan en ondas submilimétricas a alto corrimiento al rojo. El fenómeno de brotes violentos de formación estelar es el resultado de los cambios abruptos que experimenta el medio interestelar al deshacerse de su momento angular e incentivar su caída a gran escala hacia las regiones centrales de las galaxias. Estas calamidades dinámicas están producidas por fuertes interacciones de galaxias, incluida la coalescencia entre dos o varias galaxias, y por fuertes potenciales barrados. Los movimientos de caída del gas se pueden medir con gran precisión con los interferómetros milimétricos existentes. Sin embargo, para cuantificar la cantidad de material molecular que se está transportando se debe realizar un conteo sistemático del mismo con un telescopio de apertura simple, como el GTM, que pueda cartografiar toda la galaxia con gran precisión angular, incluyendo las componentes extendidas. Tales medidas nos darán información básica sobre la dinámica a gran escala de estos sistemas extremos de formación estelar.

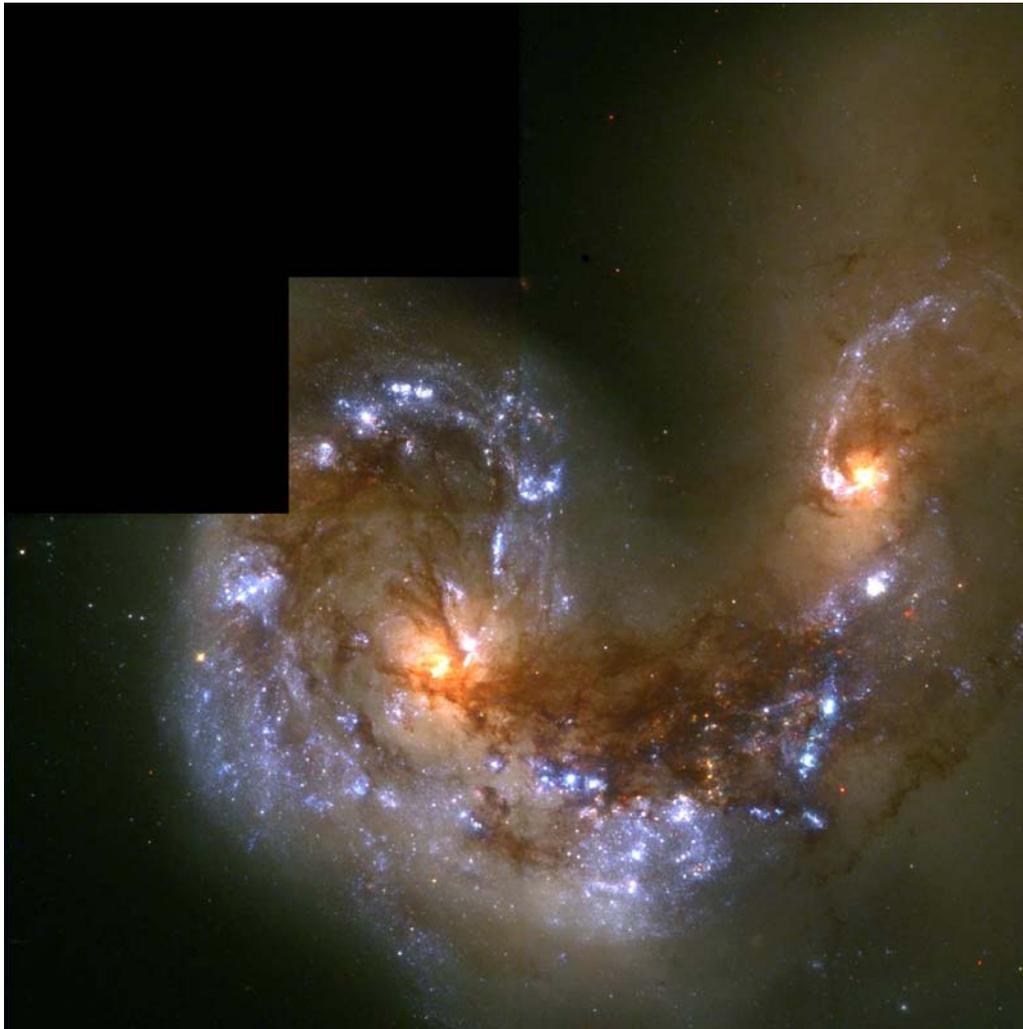


FIGURA 3.3. Imagen de los núcleos en coalescencia de las galaxias de La Antena, NGC 4038 y NGC 4039, tomada por el telescopio espacial Hubble. Este sistema es responsable de crear las condiciones para que se produzca una rápida y eficiente conversión del gas molecular en estrellas. El GTM medirá este proceso mediante el trazado del flujo del gas molecular en las zonas centrales del sistema. [B. Whitmore, STSCI].

Una de las nuevas técnicas que ofrecerá el GTM será el uso de las líneas de recombinación de hidrógeno para localizar las estrellas masivas en formación y la tasa de formación neta. Puesto que todas las estrellas jóvenes masivas nacen rodeadas de un caparazón grueso de gas y polvo, la mayor parte de la radiación

que generan se ve absorbida por el polvo y se rerradia en ondas infrarrojas. En consecuencia, normalmente se realiza una inferencia de la tasa de formación estelar por medio de la luz infrarroja. Las líneas de recombinación del hidrógeno en ondas milimétricas se originan en el gas que rodea a las estrellas, que se ioniza debido al fuerte campo de radiación ultravioleta que éstas generan. Los caparazones de gas y polvo son transparentes a las ondas milimétricas, por lo que las líneas de recombinación del hidrógeno no se ven atenuadas, y podremos detectarlas con el GTM e interpretarlas en términos de la formación de estrellas masivas. Se podrán detectar, además, varias transiciones de recombinación simultáneamente entre 1 y 3 mm, mejorando la eficiencia observacional al combinar su señal.

3.4 Exploración de las condiciones físicas del medio interestelar

Las transiciones rotacionales de CO son una herramienta que permite cuantificar las propiedades globales de las nubes moleculares gigantes, pero su utilidad puede verse limitada por las grandes opacidades en línea y la insensibilidad en las zonas de alta densidad ($> 10^5 \text{ cm}^{-3}$) de las nubes en las que se condensan las estrellas. La densidad superficial del gas se puede determinar sin utilizar muchas suposiciones,

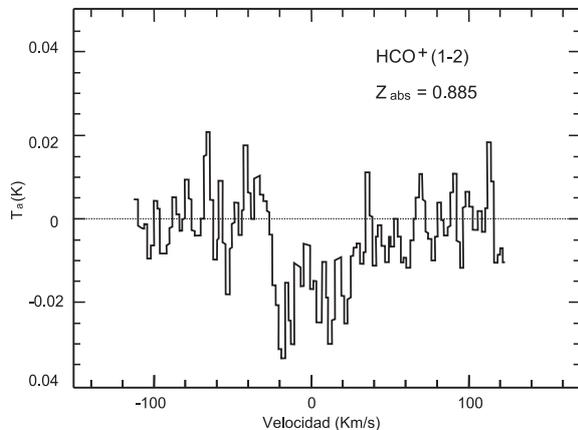


FIGURA 3.4. Sistema en absorción a $z = 0.885$ detectado en $\text{HCO}^+(1-2)$ hacia el cuasar de alto corrimiento al rojo PKS 1830–211 con el telescopio de 14 m del FCRAO. [M. Yun, University of Massachusetts Amherst/FCRAO].

si se emplean trazadores del hidrógeno molecular con menor opacidad, como ^{13}CO o el continuo térmico emitido por el polvo. Además, se pueden medir las condiciones del gas denso mediante transiciones múltiples de una molécula dada, como por ejemplo HCN, HCO^+ o CS. No obstante, dichos diagnósticos son difíciles de obtener, ya que las líneas son intrínsecamente débiles y los factores de relleno son muy pequeños, haciendo que la señal sea todavía más débil. Para superar tales limitaciones es esencial contar con una gran área colectora. El GTM podrá investigar la variación de las condiciones del gas molecular en función de la posición radial dentro de la Galaxia, haciendo uso de su conjunto de instrumentos cartográficos y su gran apertura. Las condiciones encontradas se podrán

comparar directamente con las tasas y la eficiencia de formación estelar para evaluar los procesos que las regulan.

La sensibilidad y precisión de la superficie del GTM son también esenciales para investigar las condiciones físicas del medio interestelar de galaxias más distantes. Los astrónomos ópticos han explotado por años la luz proveniente de objetos brillantes distantes que, a su paso por nubes de gas más cercanas, es absorbida, desarrollando así métodos para determinar la naturaleza del gas absorbente templado y caliente en y alrededor de las galaxias. En principio, las mismas técnicas se pueden utilizar en ondas milimétricas. De hecho, ya se ha identificado un grupo pequeño de sistemas en absorción a estas frecuencias. Sin embargo, el número de sistemas distantes de fondo tan brillantes como para permitir estos estudios en ondas milimétricas es pequeño para la apertura de los telescopios con los que se cuenta en la actualidad. Además, estos telescopios tienen una cobertura instantánea de frecuencia extremadamente limitada, de forma que la búsqueda de líneas de absorción es una tarea muy ineficiente.

La alta sensibilidad del GTM incrementará el número de objetos de fondo a explorar en varios miles, y podrá cubrir un gran intervalo de frecuencia y encontrar un gran número de sistemas en absorción, para caracterizar la física de los mismos con estudios de seguimiento más detallados. Cuando se compile un conjunto de datos que abarque un abanico de transiciones moleculares en una gran variedad de sistemas en absorción, a diferentes corrimientos al rojo, se podrá concluir qué propiedades del medio interestelar sufren variaciones, tales como la densidad, la temperatura y las abundancias de las especies químicas. Asimismo, por medio de las variaciones se podrán explorar aspectos globales del Universo como la temperatura del fondo de radiación cósmica de microondas o el valor de las constantes fundamentales de la física.

3.5 Cartografía de galaxias cercanas

Según los modelos cosmológicos en los que el Universo está dominado por materia oscura fría, las galaxias se forman y evolucionan en regiones densas por un colapso gravitatorio y un subsiguiente acrecentamiento de materia. En estos modelos, las galaxias se vuelven más grandes y pesadas mediante una serie de coalescencias entre grandes estructuras y el canibalismo de galaxias más pequeñas y nubes de gas de la vecindad. Por lo tanto, el ambiente en que se desarrollan las galaxias desempeña

un papel crítico en su historia de acrecentamiento de masa y en su historia de formación estelar. En un estudio pionero,⁴ y todavía no sobrepasado, el telescopio de 14 m del FCRAO obtuvo medidas de la emisión de CO (1 – 0) de unas 300 galaxias para caracterizar el contenido de gas molecular de diferentes tipos morfológicos de galaxias. Debido a limitaciones observacionales, sólo se realizaron barridos a lo largo de los ejes mayores de las galaxias o sólo se obtuvo la emisión global de las galaxias, de forma que se conocen únicamente las características globales del gas. Una caracterización completa de la distribución y cinemática del gas, la formación estelar y su dependencia con la riqueza del entorno requiere mapas completos.

La importancia crucial del entorno y la necesidad de resolver el contenido gaseoso de las galaxias se demuestra con toda claridad en la imagen del censo de CO de las galaxias del cúmulo de Virgo realizado con el 14 m del FCRAO. Como se muestra en la figura 3.5, la extensión espacial del gas frío está sustancialmente truncada en las galaxias de disco que se encuentran cerca del centro del cúmulo, tal como éste se ve señalado por la emisión en rayos X. El truncamiento revela que la presencia del gas intercúmulo y la gran densidad de galaxias cerca del centro tienen un impacto directo en el contenido de material interestelar de las galaxias y, con el tiempo, en su formación estelar presente y futura. En la actualidad, con el 14 m del FCRAO se está llevando a cabo la cartografía en CO de las galaxias con mayor tamaño angular que conocemos, que son el objetivo del censo Spitzer de galaxias infrarrojas cercanas (SINGS).

Los astrónomos del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica y de la University of Massachusetts Amherst llevarán a cabo censos del contenido de gas molecular, mediante trazadores como el CO, de una amplia muestra de galaxias que representen una gran variedad de entornos. La comparación de la emisión CO con el H I y las imágenes infrarrojas de Spitzer deberán revelar la relación entre la distribución a gran escala del gas frío y las estructuras estelares. En sus primeros años de operación, el GTM cartografiará centenares de galaxias a distancias de hasta 100 Mpc, con resoluciones menores de 1 kpc, para compilar un banco de datos de distribuciones del gas y polvo, que permitan una caracterización estadísticamente significativa de las galaxias y la influencia de sus entornos.

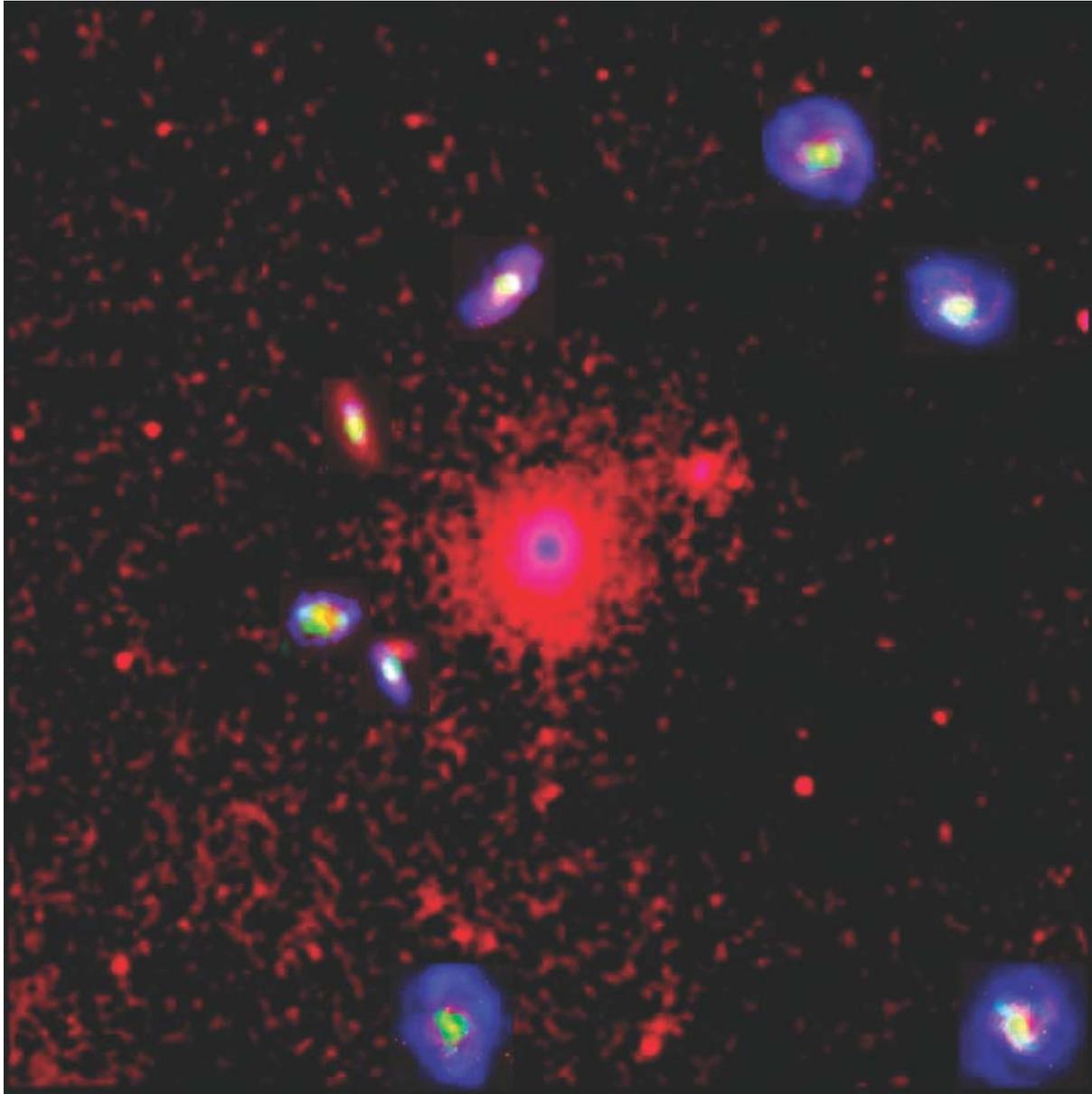


FIGURA 3.5. Imagen en color compuesto de nueve galaxias del cúmulo de Virgo: la emisión de CO se representa en verde, la de HI en azul, la emisión en rayos X en magenta, y la emisión en el visible, localizada en el interior de las galaxias, en rojo. La emisión de CO proviene de datos adquiridos con la cámara SEQUOIA en el 14 m del FCRAO.⁵ Las imágenes de las galaxias se han magnificado para mostrar sus detalles morfológicos.

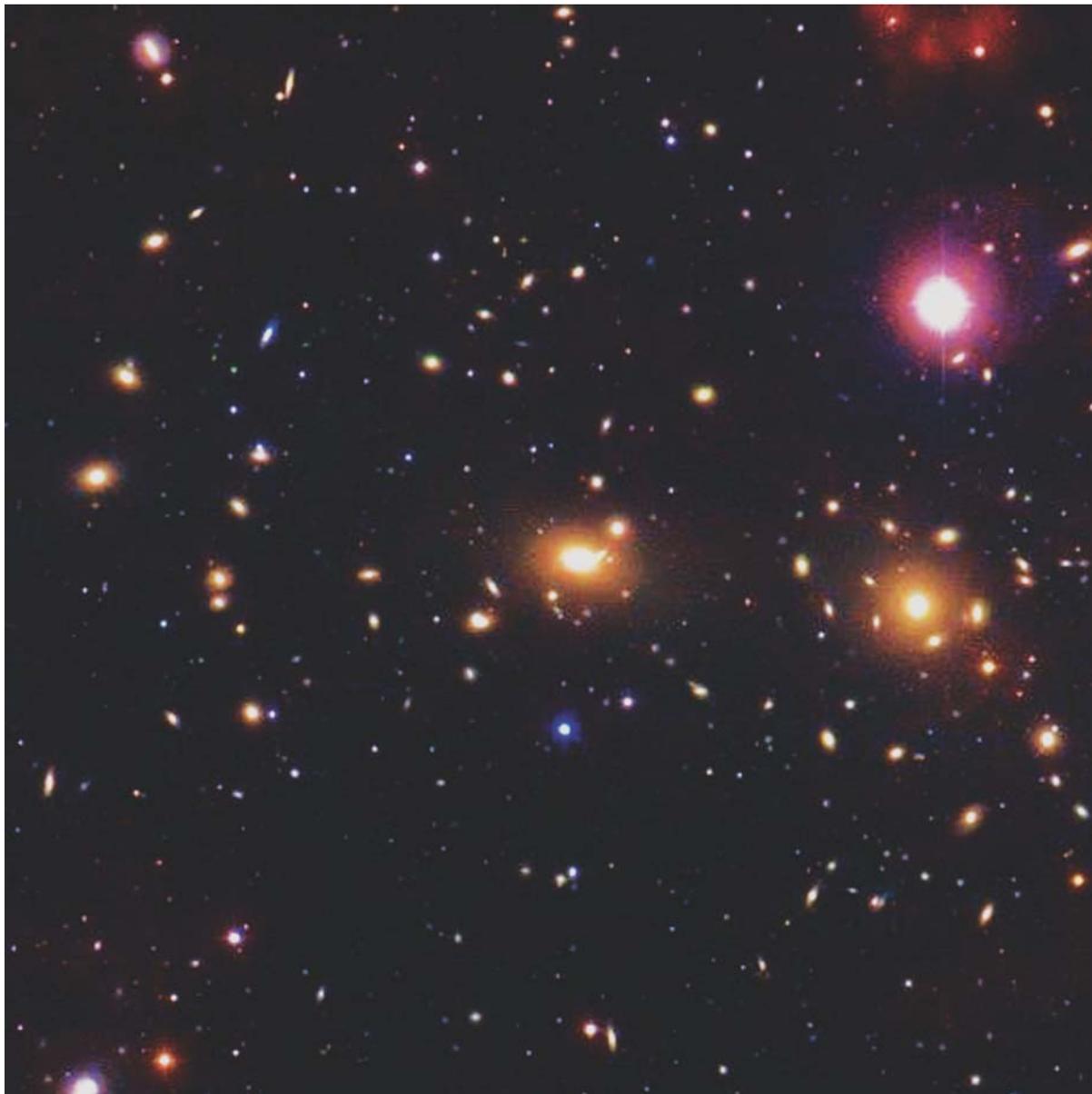


FIGURA 3.6. Imagen en el visible de la región central del cúmulo de Coma. Centenas de galaxias como éstas se podrán cartografiar simultáneamente con el GTM. [O. López-Cruz, INAOE/NOAO e I. Shelton, University of Toronto/NOAO].

3.6 Exploración de la Galaxia con la técnica de interferometría de base muy larga

La inclusión del GTM en varias redes globales de interferometría de base muy larga (VLBI) ofrece la posibilidad de alcanzar resoluciones angulares sin precedentes y, consecuentemente, atacar problemas astrofísicos fundamentales de forma novedosa.

3.6.1 Cartografía del horizonte de sucesos de un hoyo negro

Quizás el proyecto más prometedor y revolucionario que el GTM puede ofrecer en la red de interferometría de base muy larga es establecer la existencia y la naturaleza del hoyo negro supermasivo de la Vía Láctea. La mayor parte de la comunidad científica acepta que la fuente de energía que alimenta a los núcleos activos de galaxias es el acrecentamiento de un hoyo negro supermasivo, ya que la producción de energía y los tamaños en los que ésta se produce excluyen casi todos los procesos alternativos. Sin embargo, para ser una teoría tan comúnmente aceptada, tenemos un conocimiento muy impreciso de los procesos y condiciones físicas en escalas de unos pocos radios de Schwarzschild (R_{Sch}), cerca del horizonte de sucesos del hoyo negro.

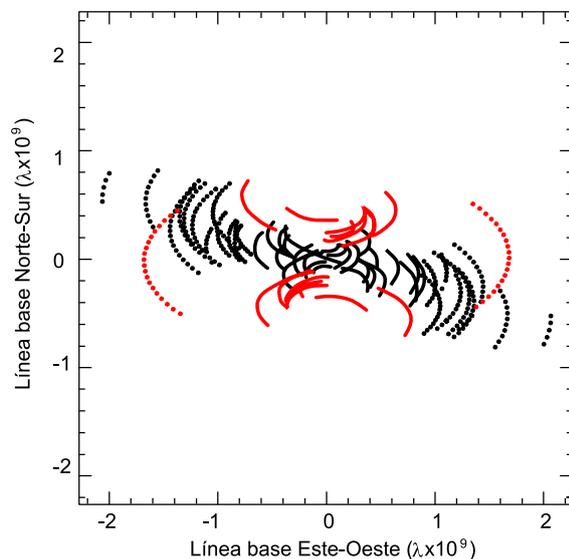


FIGURA 3.7. Cobertura de las líneas de base de la red de VLBI a 86 GHz utilizando el VLBA y el GTM. Cuanta más cobertura tiene este plano, más precisas se vuelven las imágenes astronómicas y menos tiempo se invierte en las observaciones. La cobertura del VLBA se muestra en negro, y las líneas de base aportadas por la inclusión del GTM se muestran en rojo. El GTM proporcionará a la red de VLBI las críticas líneas de base norte-sur, que permitirán búsquedas de estructuras débiles, además de duplicar la sensibilidad del interferómetro. [S. Doeleman, NERO, Haystack Observatory].

Mediante esta técnica interferométrica se pueden estudiar las zonas centrales de los núcleos activos de galaxias, cerca de la singularidad central. El mejor caso a estudiar es, sin duda, la radiofuente compacta de nuestra galaxia, SgrA*. La interpretación de que sea la manifestación de un hoyo negro de unos 4 millones de masas solares se debe a una sólida evidencia observacional. La dispersión de velocidades de las estrellas en torno al centro de la Galaxia y las órbitas descritas por estas estrellas⁶ indican que una masa de esta magnitud está encerrada en el centro de la Vía Láctea. Los límites superiores al movimiento propio de SgrA* también indican que la radiofuente debe estar asociada con al menos 400 000 masas solares. Estas medidas de la masa, combinadas con los tamaños intrínsecos medidos con VLBI a 43 y 86 GHz⁷ implican que la densidad de masa excede los dos millones de trillones de masas solares por parsec cúbico ($2 \times 10^{24} M_{\odot}/\text{pc}^3$), lo que equivale a cuatro órdenes de magnitud menos que la densidad de un hoyo negro de 4 millones de masas solares. Puesto que cualquier agregación de la materia con estas densidades se convertirá en un hoyo negro en una escala de tiempo menor que la edad de la Galaxia, este resultado se toma como el mejor indicio de la existencia de hoyos negros supermasivos. Sin embargo, ésta no es una prueba concluyente, ya que para ello se necesitaría presenciar movimientos relativistas en el horizonte de sucesos o algún otro proceso relativista provocado por la singularidad gravitatoria.

El medio interestelar ionizado disipa y agranda las imágenes en radio de SgrA* con una dependencia cuadrática respecto a la longitud de onda, de forma que las frecuencias más altas son las más importantes para establecer límites al tamaño de SgrA*. En la banda de 86 a 230 GHz se puede usar el GTM en combinación con el resto de los telescopios de la red de VLBI para observar las estructuras y los procesos que ocurren a unos pocos radios de Schwarzschild del horizonte de sucesos. A 86 GHz la mayor sensibilidad del GTM, acoplada con las líneas de base norte-sur con las que complementa al VLBA, permitirá probar si existen asimetrías en la estructura interna de SgrA* a escalas de 6 a 10 R_{Sch} . Estas asimetrías están predichas por los modelos de eyección en los que la emisión de SgrA* estaría producida por un chorro saliente de partículas relativistas, análogo a los chorros observados en radio en núcleos activos extragalácticos. La escala de tiempo de las fulguraciones en rayos X y en el infrarrojo de SgrA* corresponde a decenas de R_{Sch} , lo que plantea la interesante posibilidad de observar cambios estructurales durante una de las observaciones de VLBI.

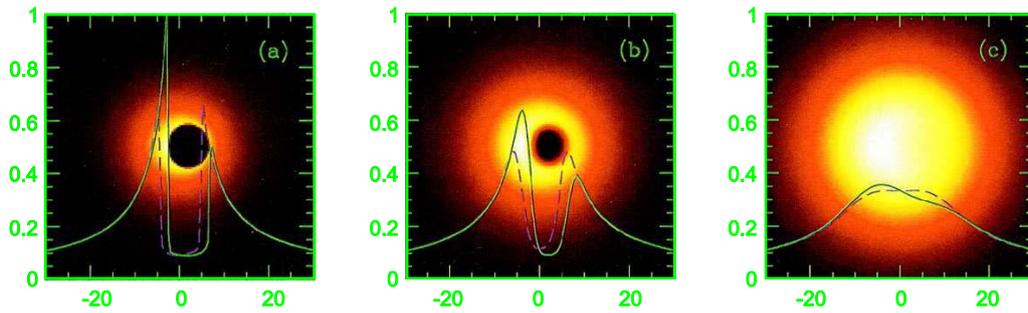


FIGURA 3.8. Imágenes simuladas de un disco de emisión ópticamente delgado, en caída libre, que circunda un hoyo negro supermasivo en rotación. El cuadro (a) muestra el brillo superficial derivado de los cálculos relativistas; el cuadro (b) muestra lo que el VLBI podría observar a 450 GHz, incluyendo los efectos de dispersión y la anchura del haz del interferómetro, y el cuadro (c) muestra la emisión a 230 GHz que el VLBI podría observar bajo las mismas condiciones. Las líneas continuas y discontinuas representan los cortes verticales y horizontales del perfil de brillo, con el eje de ordenadas marcando las intensidades relativas. El eje de abscisas da la distancia radial en unidades de la mitad del radio gravitacional del hoyo negro ($0.5 \times R_{\text{sch}}$). [H. Falcke *et al.* ©AAS].⁸

La resolución angular a 230 GHz aportada por el GTM mediante las líneas de base conjuntas con las antenas de Hawai y Sudamérica es suficiente para emprender la búsqueda de los dramáticos efectos relativistas cuya existencia se predice en los alrededores más inmediatos del hoyo negro del Centro Galáctico. Un hoyo negro embebido en un flujo de acrecentamiento ópticamente delgado debería manifestarse como una depresión central en el perfil de brillo, o como una sombra. La morfología de sombra requiere la presencia de una singularidad, y los modelos muestran que las configuraciones de la red de VLBI cuando operan entre 230 y 450 GHz deberían ser lo suficientemente sensibles como para detectar esta señal.⁸ SgrA* se podría convertir en un banco de pruebas para la teoría de la relatividad general y para la modelación de los flujos de inyección y eyección de un hoyo negro. Observaciones como éstas pondrían fin a la hipótesis de la existencia de los hoyos negros supermasivos, para introducirlos en la esfera de realidad que debe incorporarse en los modelos físicos.

3.6.2 Aceleradores cósmicos: mecanismos de emisión y colimación de los chorros relativistas

Una de las cuestiones fundamentales en la física de los núcleos activos de galaxias es la determinación del mecanismo con el que éstos pueden acelerar y colimar los chorros relativistas de partículas. Las observaciones del VLBI de movimientos superlumínicos confirman que en muchos casos la inyección del chorro debe ser cercano a la velocidad de la luz ($0.98 c$ en el caso de la galaxia Seyfert 3C 120). Sólo el VLBI en su configuración de mayor resolución angular puede seguir el movimiento de estos chorros en su base. Se necesita observar en frecuencias altas para penetrar los nódulos observados en radio, ya que son ópticamente gruesos y se deben evitar los efectos de de-polarización Faraday, que enmascaran las estructuras del campo magnético a frecuencias más bajas. Una configuración del VLBI global a 43 GHz ya ha mostrado que el chorro de M87 (Virgo A) se abre a $\sim 100 R_{\text{sch}}$ de su hoyo negro, lo que implica que la colimación del chorro está gobernada por el disco de acreción y no por los procesos de la vecindad del hoyo negro.⁹ Estas mismas observaciones también muestran un abrillantamiento del limbo de la base del chorro, lo que refuerza el concepto de que está colimado magnéticamente. Las nuevas configuraciones a 86 y 230 GHz con el GTM, que utilizarán los sistemas de grabación de banda ancha,

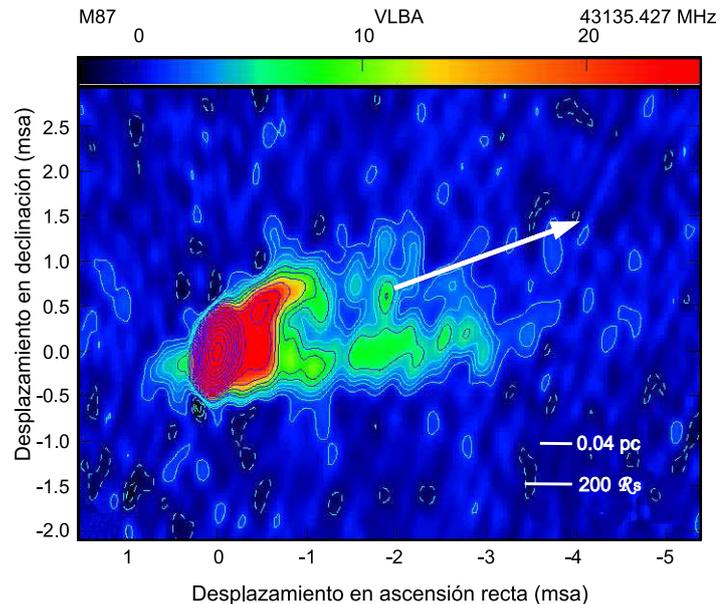


FIGURA 3.9. Imagen obtenida con el VLBA de M87 a 43 GHz. La emisión del chorro se detecta claramente de los 0.5 a los 3 milisegundos de arco (de 140 a 820 R_{sch} para el hoyo negro de $3 \times 10^6 M_{\odot}$, que se cree alimenta la actividad de su núcleo galáctico). La dirección de la base del chorro se alinea con la dirección del chorro de gran escala, de más de 1 kpc, que se señala con una flecha. La alta sensibilidad del VLBI cuando incluya el GMT permitirá obtener imágenes como ésta a tan sólo 10 a 25 R_{sch} . [C. Ly *et al.* ©AAS].¹⁰

llegarán a resoluciones lineales de 10 a 25 R_{sch} en M87, permitiendo la realización de experimentos sobre los mecanismos de aceleración magnetohidrodinámicos en escalas comparables al disco de acreción. Las observaciones polarimétricas a altas frecuencias serán igualmente importantes, ya que medirán los campos magnéticos al inicio del proceso de colimación. Otras fuentes, incluyendo 3C 120, se podrán estudiar con una resolución lineal similar.

Referencias

- [1] Heyer, M. *et al.* (2004), *Astrophys. J.* **602** 723.
- [2] Rownd, B.K. y Young, J.S. (1999), "The Star Formation Efficiency within Galaxies", *Astron. J.* **118**, 670.
- [3] Wong, T. y Blitz, L. (2002), "The Relationship between Gas Content and Star Formation in Molecule-rich Spiral Galaxies", *Astrophys. J.* **569**, 157.
- [4] Young, J. *et al.* (1995), "The FCRAO Extragalactic CO Survey. I. The Data", *Astrophys. J. Suppl.* **98**, 219.
- [5] Kim, H. R. (2003), "CO Imaging Survey of Virgo Cluster Spirals", Tesis Doctoral, Busan National University, Corea.
- [6] Schoedel, R. *et al.* (2002), "A star in a 15.2-year orbit around the supermassive black hole at the centre of the Milky Way", *Nature* **419**, 694.
- [7] Bower, G.C. *et al.* (2004), "Detection of the Intrinsic Size of Sagittarius A* Through Closure Amplitude Imaging", *Science* **304**, 704.
- [8] Falcke, H., Melia, F. y Agol, E. (2000), "Viewing the Shadow of the Black Hole at the Galactic Center", *Astrophys. J.* **528**, L13.
- [9] Junor, W., Biretta, J. y Livio, M. (1999), "Formation of the radio jet in M87 at 100 Schwarzschild radii from the central black hole", *Nature* **401**, 891.
- [10] Ly, C., Walker, R. C., y Wrobel, J. M. (2004), "An Attempt to Probe the Radio Jet Collimation Regions in NGC 4278, NGC 4374 (M84), and NGC 6166", *Astron. J.* **127**, 119.

4. Formación estelar y medio interestelar en la Vía Láctea

4.1 Introducción

EL MEDIO INTERESTELAR, es decir, la materia y energía entre las estrellas, es de vital importancia para la evolución galáctica, ya que en él se forman las estrellas, y es a este medio al que las estrellas devuelven materia enriquecida en elementos pesados, que son esenciales tanto para la formación de los planetas como para el desarrollo y la evolución de la vida.

4.2 Procesos de formación estelar

Las estrellas se forman en regiones densas localizadas en las nubes moleculares gigantes de las galaxias. Si bien los mapas trazados con ondas milimétricas son capaces de localizar las nubes moleculares en galaxias externas, se necesitan observaciones de mayor resolución angular para describir la dinámica interna de las nubes y derivar las condiciones iniciales de la evolución protoestelar. Esta resolución sólo se puede alcanzar en las regiones de formación estelar de nuestra propia galaxia, la Vía Láctea. El GTM posee un amplio abanico de instrumentos para investigar la gama de escalas y procesos relacionados con la formación estelar en las nubes moleculares de la Vía Láctea. La capacidad del GTM de cartografiar rápidamente la emisión de las líneas moleculares y del continuo térmico del polvo permitirá investigar la dinámica global de las nubes, el desarrollo de núculos masivos y concentraciones pre-protoestelares desde un sustrato de baja densidad, el colapso gravitatorio del material en discos circunestelares, y el desarrollo de vientos estelares. La baja latitud geográfica del sitio donde se ubica el GTM representa una gran ventaja para este



FIGURA 4.1. Imagen en color compuesta de la emisión en rayos X del centro de la Vía Láctea, elaborada con datos del observatorio Chandra. La gama de colores corresponde a la energía de los rayos X: desde el rojo (baja) al azul (alta). Esta región de la Galaxia es rica en gas molecular, y en ella se han detectado casi todas las moléculas interestelares conocidas. [D. Wang, University of Massachusetts Amherst].

tipo de proyectos, puesto que permitirá observar las regiones centrales de la Vía Láctea para caracterizar condiciones del gas interestelar más extremas que las de la vecindad solar. Con el GTM será posible observar tanto las regiones de formación estelar más distantes del anillo molecular, como la región del Centro Galáctico.

Para comprender con precisión los procesos que llevan a la formación de las estrellas se requiere una descripción de la dinámica de las nubes moleculares. Tal descripción fija la escala de tiempo con la que la nube puede producir una generación de estrellas, y también el modo de formación, ya sea agrupado o distribuido. Las imágenes de alta resolución de nubes moleculares cercanas revelan una red de filamentos, cascarones y nódulos de gran densidad, que reflejan la complejidad de la dinámica que caracteriza a las nubes. Dicha complejidad es producto de los movimientos expansivos de las regiones H II y de los vientos estelares, así como de la interacción de las presiones magnetoturbulentas y la gravitación propia de la nube. La determinación de la importancia relativa entre los campos magnéticos, la turbulencia y los choques producidos por los vientos es uno de los objetivos centrales de los estudios contemporáneos de nubes moleculares, y el tema de un agitado debate entre los astrónomos teóricos.

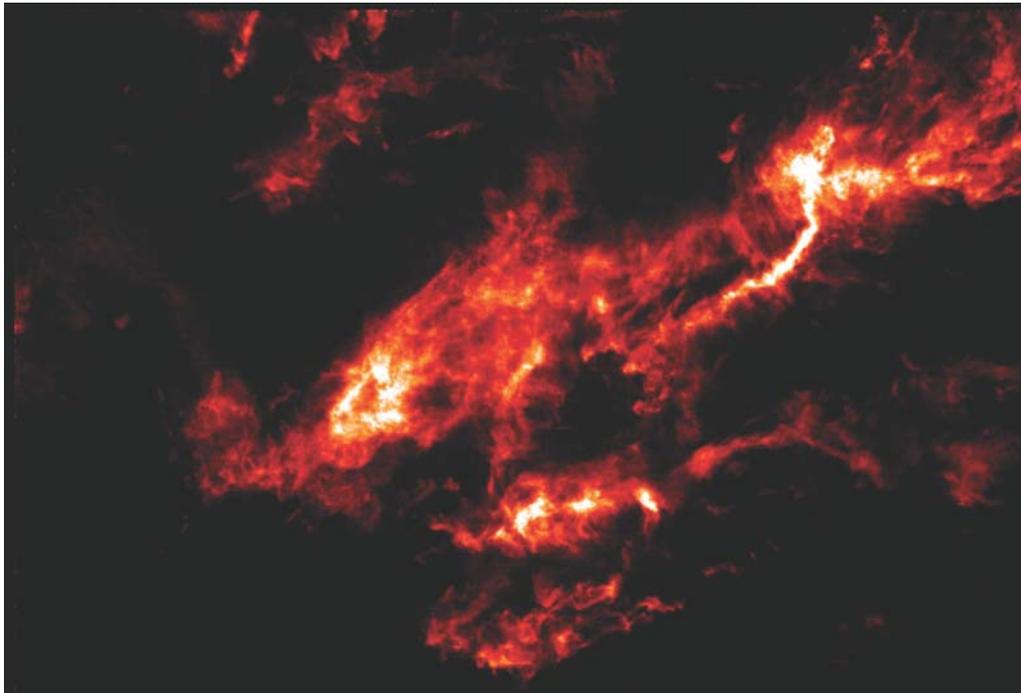
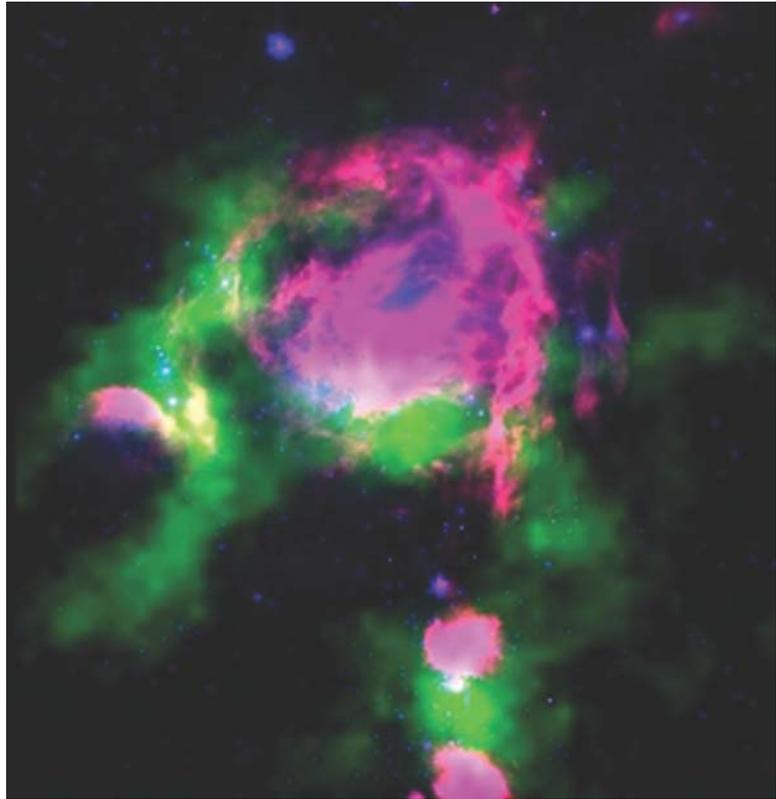


FIGURA 4.2. Imagen de la emisión $^{13}\text{CO } J = 1 - 0$ de la nube molecular de Tauro, una región de formación estelar observada por el telescopio de 14 m del FCRAO con el receptor SEQUOIA. El GTM podrá cartografiar sistemas de formación estelar mucho más lejanos, y explorar un abanico mucho más amplio de medios interestelares. [M. Heyer, University of Massachusetts Amherst/FCRAO].

El GTM resolverá este debate mediante observaciones que impondrán condiciones de contorno a los modelos teóricos del medio interestelar y de la formación estelar. Los mapas de gran campo que podrán ser trazados con el GTM darán una gran cantidad de información dinámica, mucho más rica que la ofrecida por los telescopios milimétricos y los interferómetros con los que contamos hoy día, ya que se recobrarán tanto las escalas espaciales pequeñas como las grandes. Asimismo, la doble polarización de los sistemas heterodinos del GTM permitirá detectar y cartografiar el efecto Zeeman en las nubes moleculares y determinar las variaciones espaciales del campo magnético.

Se han identificado dos modos de formación estelar en las nubes moleculares: distribuido y agrupado. La formación estelar distribuida ocurre en nódulos pequeños (0.1 pc), aislados, de baja masa $\sim 1-10 M_{\odot}$ y alta densidad, de alrededor de

FIGURA 4.3. Imagen en color compuesto de la región de formación estelar Sharpless 235, cartografiada por el telescopio espacial Spitzer. En azul se muestran las estrellas embebidas en la nube y las estrellas de fondo. En rosa se representa la emisión de los hidrocarburos policíclicos aromáticos que están excitados por la radiación ultravioleta de las estrellas masivas. En verde se muestra la distribución de $^{13}\text{CO } J = 1 - 0$.
[J. L. Hora *et al.* ©AAS].¹



10 000 moléculas por cm^3 , que generan típicamente una sola estrella de baja o moderada masa. La nube molecular de Tauro es un ejemplo prototípico de dicho modo de formación estelar. La mayor parte de los esfuerzos teóricos y observacionales para entender la formación estelar se han centrado en este modo básico y fundamental. Sin embargo, la mayoría de las estrellas de la Galaxia emergen de sitios con formación estelar agrupada, que no está tan bien caracterizada. Las regiones densas en las que se forman los cúmulos de estrellas son más extensas, de 0.5 a 1 pc, más masivas, de 1000 a 10000 M_{\odot} , y densas, 1 millón de moléculas por cm^3 , y más inhomogéneas que los nódulos asociados con la formación estelar distribuida. Las regiones en las que se forman cúmulos estelares pueden llegar a generar entre 100 y 1000 estrellas, y son casi exclusivamente sitios de formación estelar masiva. Los nódulos masivos son brillantes tanto en líneas moleculares como en emisión térmica del polvo, y se suelen asociar con regiones H II compactas o evolucionadas.

No obstante, hay pocas regiones cercanas de este tipo que puedan ofrecer datos sobre sus orígenes en las nubes moleculares, y sobre las interacciones complejas que deben ocurrir entre las protoestrellas ahí embebidas.

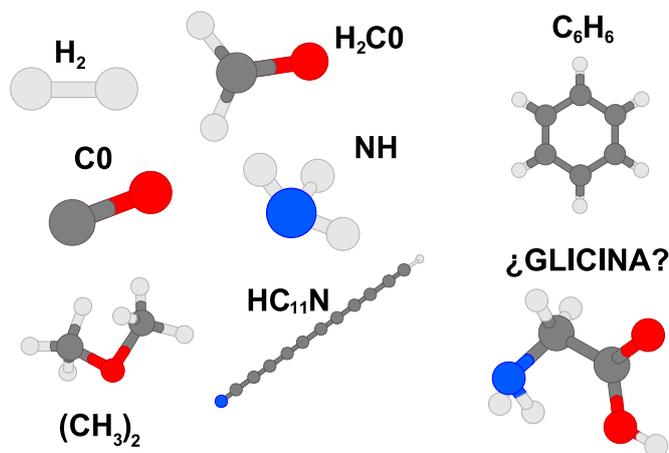
El GTM producirá una descripción definitiva de los núdulos masivos del medio interestelar de la Vía Láctea. Los instrumentos AZTEC y SPEED cartografiarán la emisión de polvo que permitirá identificar los objetos protoestelares dentro de los núdulos masivos, complementando las medidas tomadas por el telescopio espacial Spitzer. La dinámica local y la química de los núdulos masivos se determinará mediante los mapas de las líneas de emisión moleculares, que trazan directamente la distribución del gas. Las medidas complementarias definirán el acoplamiento entre la dinámica y las condensaciones protoestelares.

La formación de una estrella es el resultado del colapso gravitatorio de una parcela de gas denso en una nube molecular. El estudio de las protoestrellas permite conocer las condiciones iniciales requeridas para propiciar la formación estelar, la evolución protoestelar y la formación de sistemas solares como el nuestro. En las etapas más tempranas de la formación estelar, las protoestrellas están embebidas en un caparazón de gas y polvo y, por lo tanto, no son observables con telescopios ópticos e infrarrojos. En cambio, las ondas milimétricas sí pueden penetrar el polvo y darnos pruebas espectrales de los movimientos de caída del gas hacia las regiones protoestelares. Las medidas milimétricas han impuesto restricciones sobre la velocidad de caída, el momento angular y el perfil de densidad de los núdulos protoestelares. Sin embargo, la sensibilidad de los telescopios con los que contamos hoy día imposibilita observar una de las etapas del colapso de las protoestrellas, cuando el radio de caída es grande y las velocidades son pequeñas. La gran apertura del GTM permitirá estudiar el colapso de estos objetos protoestelares en sus etapas más tempranas. Aunado a lo anterior, la resolución ofrecida por el telescopio podrá distinguir los movimientos asociados con caídas de los movimientos de rotación o de eyección, que también pueden estar presentes en el colapso gravitatorio.

4.3 Astroquímica

Las nubes moleculares son las estructuras más grandes del Universo cuya composición está gobernada por ligaduras químicas. La química interestelar es científicamente importante por sí misma, y también por sus aplicaciones a problemas astrofísicos

FIGURA 4.4. Representación de algunas moléculas, de entre las aproximadamente 130 conocidas en el medio interestelar y circunestelar. La detección del aminoácido más simple, la glicina, es un hecho controvertido, y será uno de los temas que el GTM investigará. En blanco se representa el hidrógeno, en gris el carbono, en rojo el oxígeno y en azul el nitrógeno. [P. Ehrenfreund, University of Leiden].



como la formación estelar, en la que el acoplamiento de los campos magnéticos a los iones moleculares y el enfriamiento de las nubes mediante transiciones moleculares son procesos críticos. Las temperaturas extremadamente bajas ($\lesssim 10$ K) y las densidades de las nubes, las convierte en laboratorios únicos para el estudio de ciertas moléculas, cuyas características no se han podido estudiar antes en laboratorios terrestres.² Por último, puesto que algunas moléculas orgánicas pueden estar presentes en cometas, y es posible que éstos las hayan traído a la Tierra en etapas primitivas, es concebible que el material exógeno haya sido un elemento fundamental en el origen de la vida terrestre.³

Aunque conocemos muchos aspectos de la química de las nubes interestelares densas, también desconocemos aspectos como las reacciones de la fase gaseosa, los procesos experimentados por los granos de polvo y el efecto que los campos de radiación y los rayos cósmicos tienen sobre el gas y el polvo. Los problemas son numerosos: 1] las abundancias químicas absolutas son difíciles de determinar, su cálculo depende de las condiciones físicas del medio y estas condiciones varían significativamente dentro de las nubes, y entre nube y nube; 2] las tasas de reacción y los cocientes de desglose de la fase gaseosa probablemente no se conocen lo suficientemente bien para las temperaturas extremas que reinan en las nubes moleculares; 3] la naturaleza de la superficie de los granos de polvo se desconoce y, por lo tanto, los procesos que sufren los granos no están bien constreñidos, y 4] no sabemos cuál es la tasa de intercambio de materia entre la fase sólida y gaseosa de las nubes.

Para refinar los modelos químicos se requieren medidas de la abundancia en condiciones físicas diversas, y además se deben identificar nuevas especies moleculares. La urgencia por obtener estas medidas en especies no polares y en agregaciones sólidas de la materia, en conjunción con la mayor sensibilidad de los detectores infrarrojos con los que se cuenta hoy día, está empujando la explotación de las transiciones vibracionales en el infrarrojo. No obstante, la mayor parte de la información química obtenida hasta el momento proviene de transiciones rotacionales emitidas en ondas milimétricas y submilimétricas observadas con equipos heterodinos. La alta sensibilidad del GTM permitirá observar detalladamente tales transiciones, y de ahí derivar la química de las nubes interestelares, los discos protoplanetarios y los cometas.

El alto poder cartográfico del GTM posibilitará la comparación exhaustiva del contenido químico de una gran variedad de nubes moleculares en distintos estadios de evolución, entornos y condiciones físicas. De igual manera, el GTM evaluará las fracciones isotópicas y su dependencia con los parámetros físicos y evolutivos de las nubes. Los resultados se interpretarán en el contexto de las preguntas fundamentales sobre la importancia relativa de la fase puramente gaseosa frente a la síntesis superficial de moléculas complejas en los granos del medio interestelar, y la relación entre las moléculas interestelares, la química de objetos del Sistema Solar primitivo, como los cometas, la inyección de moléculas orgánicas provenientes del espacio en la Tierra primitiva y la importancia de dichas moléculas en el origen de la vida.

4.4 Pérdida de masa estelar

Cuando las estrellas se expanden y ascienden por la rama de las gigantes rojas, su gravedad superficial se desploma, y se generan vientos estelares que retornan grandes cantidades de materia al medio interestelar. El gas reciclado es rico en elementos pesados, básicos para la generación de la vida y para la creación de trazadores moleculares de la densidad, temperatura y abundancias químicas del medio interestelar. Las estimaciones de la pérdida de masa y las condiciones físicas de las envolturas de estrellas evolucionadas dan información fundamental sobre la evolución estelar y el efecto de la formación estelar en las estructuras galácticas.

Los máseres compactos y brillantes de varias especies y transiciones moleculares pueden utilizarse en regiones ricas en moléculas para trazar la dinámica del gas y

sus condiciones físicas hasta escalas mucho más pequeñas que las de las fotosferas estelares. Ya se han elaborado películas, con observaciones del VLBI a 43 GHz de la emisión máser de SiO ($J = 1 - 0$) que rodea la variable Mira TXCam,⁴ que muestran que las pulsaciones estelares inyectan y eyectan gas en configuraciones claramente asimétricas. Los resultados del VLBI son importantes para entender los procesos de pérdida de masa, pero en realidad se necesitan transiciones múltiples del máser para determinar las condiciones físicas del gas en toda la envoltura circunestelar. El GTM podrá expandir el intervalo de frecuencias observables del VLBI y caracterizar, en un intervalo de frecuencias amplio, másers como éste. Cuando se acople con el VLBA, el GTM creará un VLBI con base espectral ultrasensible a 86 GHz que cubrirá la transición máser SiO ($J = 2 - 1$). El GTM, además, se acoplará a otras antenas milimétricas para cartografiar transiciones que se encuentran a mayores frecuencias, como las de las especies moleculares del agua, metanol, HCN y SiO, que se localizan en el intervalo de 86 a 230 GHz. La exploración de estas transiciones con el VLBI permitirá caracterizar de forma más completa la dinámica del gas y las condiciones físicas y abundancias químicas de esta importante clase de estrellas.

Referencias

- [1] Hora, J.L. *et al.* (2004), "The Role of Photodissociation Regions in Massive Star Formation", Amer. Ast. Soc. Meeting 204, #41.12.
- [2] Bell, M.B. *et al.* (1987), "Deuterium Hyperfine Structure in Interstellar C3HD", *Chem. Phys. Lett.* **136**, 588.
- [3] Ehrenfreund, P. *et al.* (eds.) (2004), *Astrobiology: Future Perspectives*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht.
- [4] Diamond, P. y Kemball, A. (2003), "A Movie of a Star: Multiepoch Very Long Baseline Array Imaging of the SiO Masers toward the Mira Variable TX Cam", *Astrophys. J.* **599**, 1372.

5. Las ciencias planetarias y la astrobiología

5.1 Introducción

EL GEM ESTUDIARÁ LOS PLANETAS, satélites y otros cuerpos menores del Sistema Solar, además de los discos protoplanetarios de sistemas externos. Algunos aspectos de estos estudios son críticos para caracterizar las condiciones que llevaron a la generación de la vida en la Tierra y para buscar condiciones similares en otros sistemas planetarios. El campo de la astrobiología incluye, entre otras, las áreas descritas en este capítulo, además de la astroquímica, que ya se ha tratado en capítulos anteriores.

5.2 Cuerpos pequeños

El Sistema Solar se originó como resultado del colapso gravitacional de una porción de una nube interestelar densa, lo que dio lugar al Sol como centro de un disco aplanado de gas y polvo, conocido como la nebulosa solar, en el que se contuvieron gases congelados, o hielos, material rocoso y materia orgánica. Los cuerpos pequeños, conocidos como planetesimales, se formaron por acrecentamiento del polvo en objetos con poco hielo y relativamente cercanos al Sol, los asteroides, y en objetos del Sistema Solar externo con más hielo, como los cometas y los objetos del Cinturón de Kuiper. Los planetesimales son de importancia fundamental para entender la formación planetaria. El registro de eventos de la infancia del Sistema Solar ha sido borrado de los planetas como la Tierra debido al calor y la presión generados por los procesos geológicos. Dichos procesos no tienen lugar en los cuerpos pequeños y de ahí que los científicos planetarios prefieran estudiar asteroides y cometas para determinar la física y química de los inicios de la formación planetaria.

Los cometas son los cuerpos que menos se han calentado durante su historia, como lo delata su alto contenido en hielos, cuya sublimación produce las características atmósferas y colas cometarias. Por lo tanto, los cometas preservan rasgos de las condiciones más tempranas. Además, los cometas y algunos fragmentos de asteroides, llamados condritas carbonáceas, han traído a la Tierra una gran cantidad de materia orgánica, particularmente en las primeras etapas de la Tierra, y se piensa que los cometas han contribuido significativamente al contenido de agua en nuestro planeta. La idea de si estas contribuciones han propiciado o no el origen de la vida es tema de debate y de intensa investigación en la actualidad.

5.2.1 Cometas

Los cometas se encuentran entre la gama de fenómenos astronómicos más vistosos y, al menos hasta los tiempos modernos, entre los más temidos. El inesperado avistamiento de una cola cometaria en el cielo se consideraba un mal presagio en las antiguas culturas del mundo, incluyendo el México prehispánico, la antigua Europa y China. Hoy día, el avistamiento de nuevos cometas se recibe con gran expectación por astrónomos, científicos planetarios y astrobiólogos, que ven en ellos reliquias que preservan las condiciones originales del Sistema Solar, que contienen información privilegiada sobre los procesos que gobernaron el nacimiento del Sol y los planetas, y el origen de la vida misma.¹

La composición química e isotópica de los volátiles cometarios muestra similitudes sorprendentes con la de sus homónimos interestelares, lo que se puede interpretar como que los cometas preservan las condiciones de las nubes de las que se formaron o que la nebulosa solar exterior imita las condiciones de las nubes interestelares. En el primer caso se pueden extraer importantes consecuencias sobre la transición entre la etapa interestelar y solar del material, mientras que en el segundo caso se pueden establecer límites sobre temperatura, densidad, campo de radiación y mezcla turbulenta en las zonas externas del disco.

En los últimos años se ha puesto en evidencia que las observaciones milimétricas y submilimétricas son una herramienta indispensable para la exploración de la química y física cometarias.² Estas observaciones permiten caracterizar la composición química, la densidad, la temperatura y las velocidades de eyección de la atmósfera cometaria, llamada coma. De hecho, casi todas las especies moleculares polares

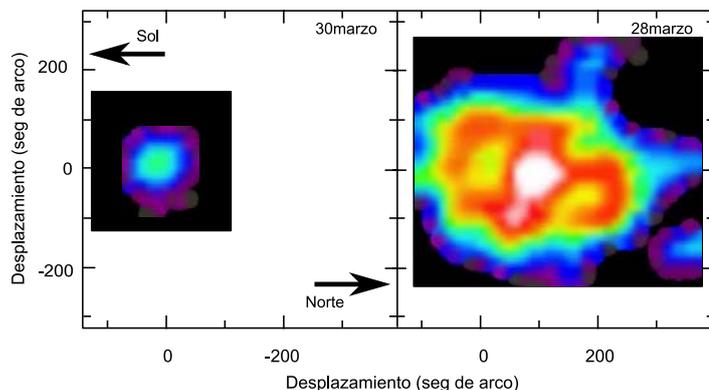


FIGURA 5.1. Cometa Hale-Boop fotografiado desde el Five College Radio Astronomy Observatory.

identificadas en cometas se han descubierto por medio de ondas milimétricas y submilimétricas. La obtención de imágenes de esta emisión es particularmente importante, ya que los parámetros físicos deben de variar a lo largo de la coma. Además, las imágenes pueden distinguir entre posibles orígenes de una especie molecular, por ejemplo sublimación de hielos nucleares o producción química o fotoquímica de la coma. Esta información es fundamental para determinar la composición del núcleo, que, de otra forma, sólo se puede determinar con experimentos *in situ*.

La poca sensibilidad y ausencia de ensambles o matrices de receptores en la mayor parte de los radiotelescopios del mundo ha limitado, hasta la fecha, los estudios de la distribución de la emisión molecular y del polvo en la coma cometaria, y el trabajo realizado en este campo proviene fundamentalmente del 14 m del FCRAO.³ Se cree que los cometas se han formado a un gran intervalo de distancias heliocéntricas. No obstante, se desconocen completamente las variaciones químicas y las diferencias de la emisión en función de su distancia al Sol. La alta sensibilidad y resolución angular del GTM permitirán una cartografía fidedigna de la distribución

FIGURA 5.2. Distribución de la emisión de las transiciones $J = 1 - 0$ de las moléculas HCN (izquierda) y HCO^+ (derecha) en el cometa Hale-Boop, observadas en el FCRAO.³ La cruz marca la posición del núcleo.



de los constituyentes moleculares y del polvo de las comas cometarias, que son parámetros críticos para conocer la naturaleza de los cometas.⁴

Los cometas más brillantes son nuevos, en el sentido de que no se han observado en la era moderna, sus periodos no se conocen con anticipación, y por lo tanto su aparición no está predicha. La flexibilidad y extensión con que las observaciones se podrán programar en el GTM permitirá tomar datos que son difíciles de obtener con otras infraestructuras, nacionales o internacionales, que en general tienen una programación muy rígida.

La emisión extendida del continuo que se observa en ondas milimétricas proviene de las partículas más grandes de polvo en la coma, que también contienen la mayor parte de la masa. Estas partículas son invisibles en ondas más cortas, pero su distribución puede medirse mediante el espectro del continuo milimétrico. Puesto que la distribución de tamaños puede cambiar a lo largo de la coma, debido a la ruptura de los granos más grandes al alejarse del núcleo, es importante cartografiar completamente la densidad de columna y el índice espectral para constreñir dicho proceso. Las imágenes tomadas con AZTEC permitirán separar la emisión del núcleo del de la coma.

La detección directa del núcleo cometario es ya un hito en sí mismo.⁵ La detección directa en el visible e infrarrojo es esencialmente imposible, debido a la confusión creada por la emisión del polvo, pero éste es un problema menor en ondas milimétricas. La temperatura de brillo superficial se podrá estimar observando el espectro en varias frecuencias: sólo así se podrá deducir el tamaño del núcleo mediante el flujo observado. Debido a que los cometas son irregulares, el tamaño expuesto en las observaciones cambiará según el cometa rote, lo que propicia el

cambio del flujo. Por lo tanto, en el seguimiento del cometa se podrá medir además del periodo de rotación, la forma del núcleo. Asimismo, tales medidas permitirán conocer la naturaleza de los centros de emisión de los chorros de gas que producen la coma.

5.2.2 Asteroides, centauros y objetos del Cinturón de Kuiper

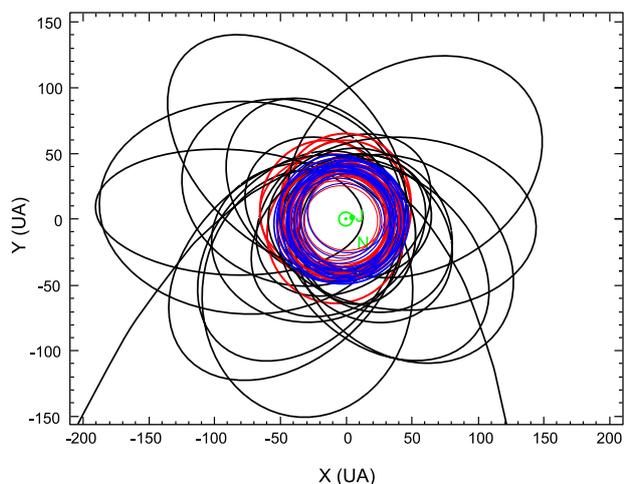
El continuo térmico emitido por asteroides y otros cuerpos pequeños permite conocer las temperaturas y, de ahí, sus propiedades termofísicas superficiales e internas. Además de los asteroides del cinturón principal, cuyas órbitas se encuentran entre las de Marte y Júpiter, la familia de los asteroides incluye los objetos que se aproximan e incluso cruzan la órbita de la Tierra, conocidos como objetos cercanos a la Tierra; a los troyanos, que se encuentran en los puntos lagrangianos de la órbita de Júpiter; a los centauros, que son planetesimales helados con órbitas comprendidas entre las de Júpiter y Neptuno, y a los objetos del Cinturón de Kuiper, que son planetesimales más allá de la órbita de Neptuno. El GTM emprenderá el primer censo de objetos pequeños en ondas milimétricas, lo que producirá catálogos de flujos, distribuciones espectrales de energía y curvas de luz de una muestra significativa de asteroides. Con este banco de datos se espera derivar la composición de los diferentes tipos de asteroides, ya que las propiedades dieléctricas de las superficies rocosas, metálicas y heladas se manifestarán en los flujos y espectros medidos.

TABLA 5.1. Objetos pequeños observables con el GTM y la cámara AZTEC en exposiciones de 30 minutos.⁶

| <i>Clase</i> | <i>Número observable</i> |
|----------------------|--------------------------|
| Cercanos a la Tierra | 100 |
| Cinturón principal | 1 500 a 2 000 |
| Troyanos | 100 a 400 |
| Centauros | 30 |
| Cinturón de Kuiper | 10 a 15 |

La determinación del tamaño de los objetos del cinturón de Kuiper es de tanto interés como la de su composición. Se necesitan observaciones en el régimen visible para caracterizar la cantidad de radiación reflejada por los objetos, y observaciones

FIGURA 5.3. Posición de las órbitas de los objetos del Cinturón de Kuiper proyectadas en el plano de la eclíptica, junto con las órbitas de los planetas gaseosos gigantes (en verde, Júpiter y Neptuno), como referencia de escala. Las órbitas trazadas en rojo pertenecen a objetos en resonancia con Neptuno, los azules a los objetos clásicos del cinturón de Kuiper y las negras a los objetos del cinturón que se encuentran más dispersos. [D. Jewitt, IfA-Hawaii].



milimétricas para medir la emisión térmica intrínseca. La radiación absorbida por un cuerpo oscuro lo vuelve caliente y, cuanto mayor es ésta, mayor es su emisión térmica, produciendo un máximo de radiación entre el infrarrojo lejano y las ondas milimétricas. El GTM podrá medir los tamaños y la reflectividad de estos objetos cuando se trabaje en coordinación con telescopios ópticos. El cámara SPEED permitirá detectar objetos del cinturón de Kuiper de menos de 200 km de diámetro, unas cinco veces menores que los observados hasta ahora en ondas milimétricas.

La detección de Sedna⁷ en 2004, a una distancia de 90 UA, es uno de los descubrimientos del Sistema Solar exterior más notables en los últimos años. Sedna tiene una órbita extremadamente excéntrica que lo lleva desde 79 hasta 900 UA en un ciclo de unos 10 000 años, siendo, por lo tanto, el primero de los objetos conocidos más allá de la zona de los objetos clásicos del Cinturón de Kuiper. Puesto que Sedna está lo suficientemente alejado de los planetas gigantes como para que su órbita haya sido perturbada, es improbable que alguna vez perteneciera al Cinturón de Kuiper. Los descubridores de Sedna propusieron que el planeta se originó en la región interna de la Nube de Oort, que es la fuente de cometas de largo periodo. Se cree que Sedna tiene un diámetro ligeramente más pequeño que el de Plutón, pero su emisión térmica está por debajo de la sensibilidad del telescopio espacial Spitzer y de la antena milimétrica de 30 m del IRAM. El GTM será capaz de observar Sedna y de caracterizar con precisión su tamaño y el de otros objetos del mismo tipo cuyo diámetro sea mayor de 500 km. Sedna ha abierto la puerta a la búsqueda de una nueva población de objetos más allá del Cinturón de Kuiper.

¿Qué es Sedna y de qué está compuesto? ¿Está relacionado con el Cinturón de Kuiper o con la Nube de Oort o es un planeta capturado de otro sistema solar?⁸ ¿Cuántos objetos como Sedna hay? El GTM podrá explorar el Sistema Solar externo, mucho más allá de Neptuno —y posiblemente más allá del Cinturón de Kuiper— y responder estas preguntas.

5.3 Atmósferas planetarias y satelitales

De entre las especies moleculares observadas en las atmósferas de los planetas y satélites planetarios podemos encontrar: CO, ¹³CO y HDO en Venus; CO, ¹³CO, H₂O y H₂O₂ en Marte; CO y HCN en Neptuno; H₂O, CO, HCN y CS en Júpiter (las tres últimas después del impacto del cometa Shoemaker-Levy 9); H₂O en Saturno; CO, HCN, HC₃N, CH₃CH y HC¹⁵N en Titán, y NaCl, SO y SO₂ en Io.

La espectroscopía de atmósferas planetarias y satelitales da información sobre la composición, temperatura y, en algunos casos, la presencia de vientos en estos cuerpos celestes.² La espectroscopía milimétrica es especialmente sensible al gas sometido a bajas presiones, pudiendo así caracterizar las atmósferas superiores. El espectro milimétrico se puede utilizar para deducir la temperatura de las atmósferas, ya que la emisión es principalmente térmica. De hecho, el perfil de las líneas espectrales milimétricas se puede utilizar para caracterizar la estructura vertical de la temperatura y la composición química y, por lo tanto, para constreñir los procesos físicos y químicos que allí ocurren. La caracterización de los gradientes de temperatura y composición química son vitales para la investigación de las atmósferas, ya que la fotoquímica y el calentamiento por fotones son procesos muy importantes. La composición atmosférica superior puede estar afectada por la presencia de vientos, así que las medidas de la composición pueden dar información indirecta sobre la circulación de la atmósfera. De hecho, los vientos se pueden medir directamente en algunos casos mediante el corrimiento Doppler de las líneas espectrales milimétricas, haciendo uso de la resolución espectral extremadamente alta de los sistemas heterodinos del GTM.

La figura 5.4 muestra las líneas de absorción milimétricas típicas de sistemas planetarios, con sus centros estrechos, ensanchados por el efecto Doppler de la atmósfera superior, y sus alas muy ensanchadas por presión. La intensidad de línea en la región ensanchada por el efecto Doppler es sensible sólo a la columna de densidad del gas absorbente. En la región ensanchada por la presión, la intensidad

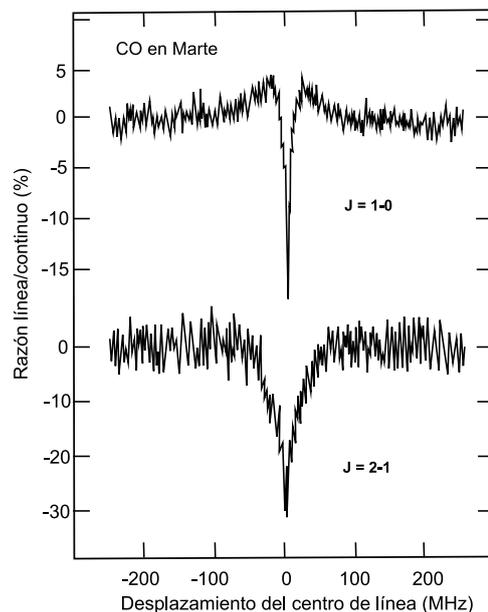


FIGURA 5.4. Absorción del monóxido de carbono en la atmósfera de Marte en las transiciones rotacionales $J = 1 - 0$ y $J = 2 - 1$, observada con el 14 m del FCRAO.²

depende fuertemente de la abundancia molecular como función de la profundidad de la atmósfera. Puesto que el ancho de la línea aumenta con la profundidad y la presión, el perfil de línea se puede invertir para obtener la distribución vertical del absorbente, dado el perfil de temperatura, que puede ser deducido de forma similar a partir de otros perfiles de línea. El ensanchamiento Doppler de la región central es proporcional a la frecuencia de la línea, y esto hace que los datos milimétricos sean mejores para estudiar la atmósfera alta que los datos infrarrojos o visibles.

El ensanchamiento por presión de moléculas típicas, como el CO, se incrementa en unos 3 MHz por cada milibar, provocando que las líneas planetarias puedan llegar a ser muy anchas. El receptor de corrimientos al rojo del GTM es un instrumento ideal para medir las anchuras de las líneas y para determinar los perfiles de temperatura y composición química en un intervalo de profundidades mucho más amplio que el que se conoce hasta la fecha. Algunos planetas, como Venus cerca de su conjunción inferior, Júpiter cerca de su oposición o Saturno y sus anillos, son demasiado grandes para ser cartografiados eficientemente por ALMA, pero son perfectos para los planes cartográficos del GTM.

El GTM hará uso de una cola de observaciones para responder rápidamente a eventos inesperados, como el vulcanismo de Venus o Io, y para programar largos

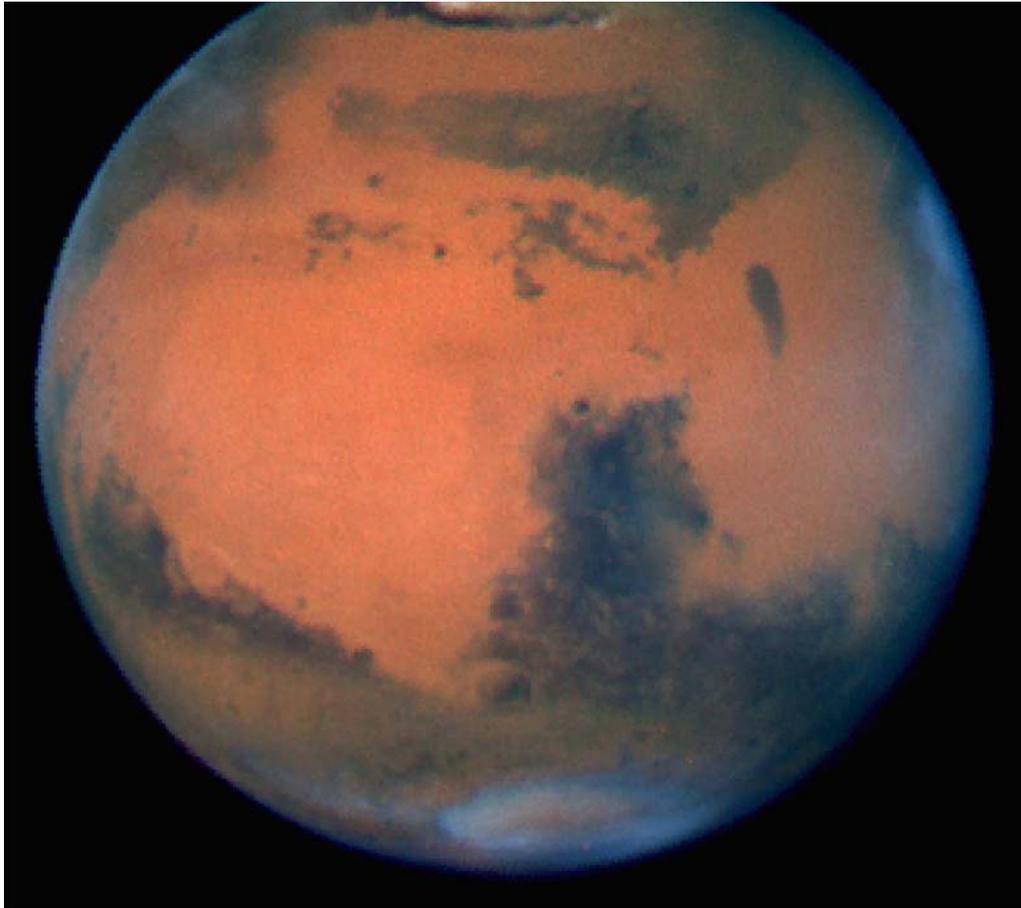


FIGURA 5.5. Imagen de Marte obtenida por el telescopio espacial Hubble. [D. Crisp y equipo científico de WFPC2, JPL/Caltech/NASA].

seguimientos de estos fascinantes objetos planetarios. De igual modo, los planetas y satélites con variaciones seculares, estacionales o rotatorias se podrán programar fácilmente.

5.4 Planetas extrasolares y discos protoplanetarios

Puesto que ya se han detectado planetas alrededor de otras estrellas de tipo solar, el estudio de casos análogos a la nebulosa solar se vuelve una posibilidad real. Existen numerosos casos de estrellas con estructuras que, con radios de cientos de

unidades astronómicas, probablemente sean discos protoplanetarios. La investigación de la física y química de estos discos es un reto, debido a su pequeño tamaño. No obstante, observaciones con otros telescopios milimétricos, como el 30 m del IRAM, han llegado a reconocer moléculas como HCN, H₂CO, CN, C₂H, CS, HCO⁺ y CO en discos que rodean a estrellas de Tauro.⁹ De la excitación de las líneas se puede estimar la densidad de H₂, y así determinar la masa y la extensión de las regiones de congelación de las moléculas en granos. El GTM podrá realizar estudios preliminares y derivar la diversidad de propiedades de los discos encontrados en las regiones cercanas de formación estelar. Posteriormente, ALMA podrá llevar a cabo una medida directa de los gradientes dada su mayor resolución y área colectora. Estos resultados son claramente importantes para la astrobiología, ya que se espera encontrar vida extraterrestre parecida a la de la Tierra en planetas similares al nuestro.

Con el GTM y la cámara AZTEC se realizará un censo exhaustivo de la emisión de polvo de los discos que rodean a estrellas jóvenes. Al comparar las masas de polvo con las edades estelares se constreñirán las escalas de tiempo en las cuales el polvo se acrecienta para formar planetas.

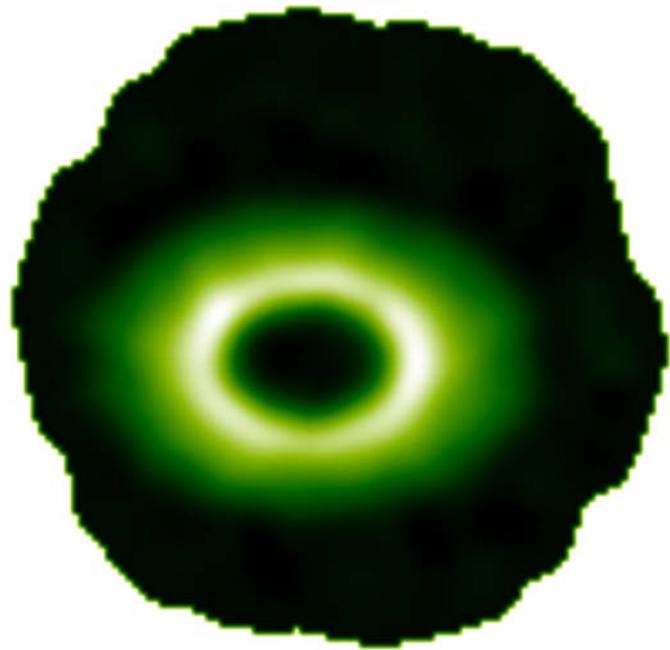


FIGURA 5.6. Imagen simulada de las observaciones con la cámara AZTEC a 1.1 mm de un disco protoplanetario.¹⁰ El disco tiene un radio interior de 40 UA, y uno exterior de 100 UA, con una inclinación de 45°, y se observa a una distancia de 3 pc. Este tipo de disco se puede crear mediante procesos que barren el material interno durante la agregación de planetesimales y la formación inicial de los planetas.

5.5 Astrobiología

Dentro de los propósitos de la astrobiología se encuentra la determinación de la evolución de los compuestos orgánicos mediante los procesos cósmicos que llevaron al origen de la vida en la Tierra y, potencialmente, en otros planetas similares. Las estrellas y los planetas se forman por el colapso de nódulos de material interestelar denso, con una etapa intermedia que pasa por discos de gas y polvo alrededor de las estrellas jóvenes. Algunas de las etapas de la evolución se pueden observar directamente, pero otras permanecen veladas por el polvo que, sin embargo, puede penetrarse con ondas milimétricas. Para comprender el origen de la vida, primero necesitamos entender la formación de nuestro propio sistema planetario, incluyendo los procesos que llevaron a los inicios de la Tierra. Si queremos evaluar la probabilidad de encontrar vida en otros planetas necesitamos antes entender las similitudes y diferencias entre la evolución de nuestro sistema y la de sistemas exteriores.

El GTM tendrá un gran impacto en el campo de la astrobiología. Como se ha descrito en los capítulos anteriores, en las escalas más grandes el conocimiento de la formación galáctica en el Universo temprano tiene un efecto directo en las escalas de tiempo de formación de los elementos químicos pesados que se necesitan para el desarrollo de la vida tal como la conocemos. Mediante el estudio de las galaxias y la formación estelar en el Universo cercano podremos discernir si las condiciones que crearon nuestro planeta en el Sistema Solar son típicas, como para que se reproduzcan en sistemas planetarios de otras galaxias. Las investigaciones sobre la Vía Láctea permitirán saber si el Sol y su sistema planetario se formaron de forma aislada o en un sistema agrupado, que podría haber sometido a la Tierra primitiva a un entorno muy energético y biológicamente peligroso. La química orgánica del medio interestelar ayudará a identificar moléculas complejas en objetos como cometas y asteroides, así como a determinar la distribución potencial de la vida basada en el carbono en la Galaxia.

La pertinencia de las investigaciones sobre el Sistema Solar para la astrobiología se ha enfatizado a lo largo de este capítulo: los cometas ligan la compleja química orgánica del medio interestelar a la química de los cuerpos que se formaron en la nebulosa solar primigenia; los cometas y condritas carbonáceas trajeron agua a la Tierra primitiva; la naturaleza de las atmósferas planetarias y satelitales son claramente fundamentales para discernir si la vida ha podido o podrá originarse en estos cuerpos celestes, y la distribución de las propiedades de los discos protoplanetarios de

otras estrellas nos dan datos fundamentales sobre la posibilidad de la existencia de vida en otras partes de la Galaxia.

5.6 Astronomía de radar

Los estudios de radar, en los que una señal de radio se emite hacia un objeto y se estudia su reflejo o eco, son quizá uno de los pocos experimentos, propiamente dichos, que se pueden realizar en astronomía, en el sentido de que el astrónomo puede escoger las propiedades de la señal a transmitir. Debido a que la intensidad de la señal transmitida y reflejada disminuye con el cuadrado de la distancia, la intensidad del eco observado depende de la cuarta potencia de la distancia, limitando la aplicación de esta técnica a los objetos del Sistema Solar. Los planetas terrestres, los satélites planetarios, los asteroides y los cometas se han convertido en objetivos frecuentes de la astronomía de radar. En contraste, los planetas jovianos o el Sol reflejan las señales de radar muy débilmente.

El eco del radar contiene información sobre la rugosidad de la superficie en escalas similares a las de la longitud de onda del radar, y también sobre sus propiedades eléctricas. Por ejemplo, el carácter del eco recogido de las regiones polares de Mercurio y la Luna sugiere que podría haber hielo en algunos de sus cráteres, posiblemente porque éstos se mantienen en sombra permanente.¹¹ Ya que el eco se puede analizar con una gran precisión como función de la frecuencia y del tiempo de recepción, las propiedades superficiales se pueden cartografiar con una resolución que excede la del telescopio radar. Además, puesto que las ondas de radar toman muestras de la superficie a diferentes profundidades según la longitud de onda empleada, se puede caracterizar la superficie a diferentes profundidades.

Dentro de la astronomía planetaria, el espectro milimétrico no está bien caracterizado debido a la falta de transmisores de alta potencia. Sin embargo, los transmisores ya se han desarrollado y la operación de estos equipos con el GTM podrá abrir una nueva era para la astronomía de radar: se podrán explorar las zonas superiores de las superficies de los planetas terrestres, los satélites y otros cuerpos menores del Sistema Solar. Asimismo, se podrán obtener medidas de las distancias y velocidades de los objetos cercanos a la Tierra mucho más precisas que las disponibles por métodos en el régimen visible, una consideración muy importante cuando se trata de proteger la Tierra del posible impacto de estos objetos.

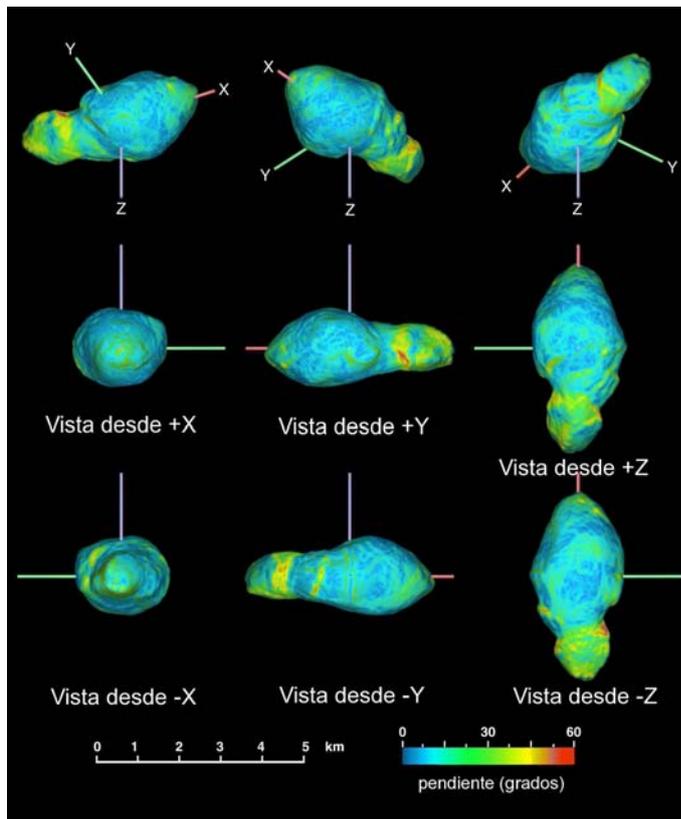


FIGURA 5.7. Modelo de alta resolución del asteroide en rotación 4 179 Toutatis, construido a partir de observaciones de radar tomadas en Goldstone y Arecibo. [R.S. Hudson, ©AAS].¹²

El GTM no estará equipado inicialmente con radares; no obstante, se tiene contemplado adquirir dichos sistemas en el futuro. Por otra parte, sería posible utilizar el telescopio como el transmisor de la señal de radar, y recibir el eco con ALMA, lo que incrementaría el área colectora, la resolución angular y el tiempo de transmisión, ya que el GTM no tendría que dejar de transmitir para actuar como receptor.

Referencias

- [1] Ehrenfreund, P. *et al.* (2002), "Astrophysical and Astrochemical Insights into the Origin of Life", *Reports Progress Physics* 65, 1427.
- [2] Schloerb, F.P. (1999), "Millimeter-wave Spectroscopy in the Solar System", en

Millimeter-Wave Astronomy: Molecular Chemistry and Physics in Space, W.F. Wall *et al.* (eds.), Kluwer Academic Publs., Dordrecht, 15-38.

- [3] Lovell, A.J. *et al.* (1998), "HCO+ Imaging of Comet C/1995 O1 Hale-Bopp", *Astrophys. J. Lett.* **497**, L117.
- [4] Irvine, W.M., Carramiñana, A. *et al.* (2003), "The Large Millimeter Telescope / El Gran Telescopio Milimétrico: A New Instrument for Astrobiology", *Origins Life Evol. Biosphere* **33**, 597.
- [5] Crovisier, J. y Schloerb, F.P. (1991), "The Study of Comets at Radio Wavelengths", en *Comets in the Post-Halley Era*, Vol. I, R. Newburn *et al.* (eds.), Kluwer Academic Publs., Dordrecht, 149-174.
- [6] Barrera-Pineda, P. S. *et al.* (2005), "Asteroid and Minor Bodies Science with the Large Millimetric Telescope", en "II International Workshop on Science with the GTC: Science with GTC 1st-light Instruments and the LMT", A. M. Hidalgo-Gómez *et al.* (eds.), *Rev. Mex. Astron. Astro. Ser. Conf.* **24**, 188
- [7] Brown, M. E. *et al.* (2004), "A Sedna update: source, size, spectrum, surface, spin, satellite", AAS- DPS meeting #36, artículo 03.01.
- [8] Kenyon, S.J. y Bromley, B.C. (2004), "Stellar Encounters as the Origin of Distant Solar System Objects in Highly Eccentric Orbits", *Nature* **432**, 598.
- [9] Dutrey, A. *et al.* (2005), "The Observation of Circumstellar Disks: Dust and Gas Components", en *Comets II*, M. Festou *et al.* (eds.), University of Arizona, Tucson.
- [10] Ramos Stierle, F. (2004), "Exo-planets: Feasibility of Detection at Millimetre Wavelengths", Tesis de Maestría, INAOE, México.
- [11] Butler, B. (2004), "Ice on Mercury and the Moon", en *Icy worlds of the Solar System*, P. Dasch (ed.), 33 - 59, Cambridge University Press.
- [12] Hudson, R.S. *et al.* (2003), "High-resolution model of Asteroid 4178 Toutatis", *Icarus* **161**, 346.

6. Desarrollo de nuevas tecnologías

6.1 Introducción

EL DESARROLLO de la astronomía moderna está ligado estrechamente a la innovación tecnológica. El deseo de los astrónomos de entender el Universo que nos rodea hace que se requieran detectores de mayor sensibilidad, mayor resolución espectral y mayor resolución angular. A su vez, los avances tecnológicos frecuentemente traen consigo nuevas e inesperadas oportunidades para el desarrollo de la investigación. Por ejemplo, el crecimiento de la radioastronomía se debe en gran parte a la tecnología del radar desarrollada durante la segunda guerra mundial. En el caso del GTM, para que el telescopio alcance las especificaciones deseadas se han desarrollado soluciones tecnológicas innovadoras. Asimismo, para resolver los problemas astronómicos expuestos en los capítulos anteriores ha sido indispensable el desarrollo de instrumentación con una sensibilidad sin precedentes.

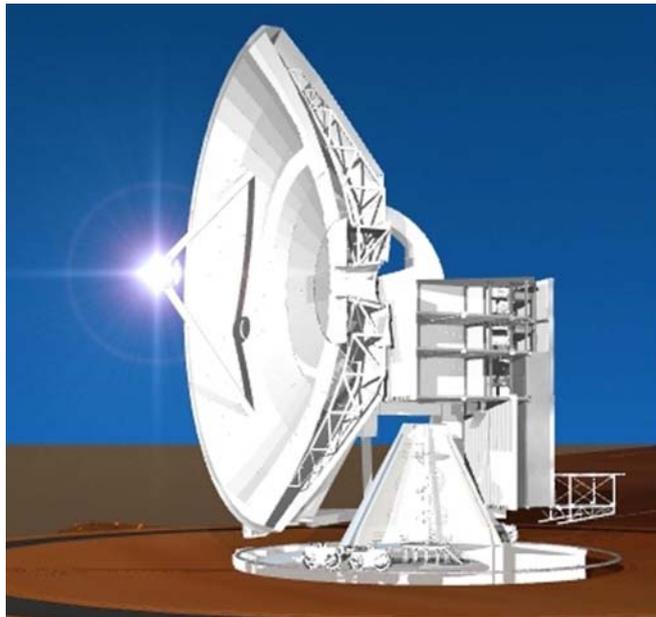


FIGURA 6.1. Modelo del Gran Telescopio Milimétrico.

6.2 Superficie activa

En cualquier telescopio es vital que la forma precisa de la óptica, conocida también como la figura, se mantenga en todas las orientaciones del telescopio. Debido a que el reflector primario tiene 50 m de diámetro, el requerimiento es extremadamente difícil de alcanzar. El reto se debe a que los efectos de la gravedad, de los cambios térmicos y del viento provocan flexiones en la estructura del telescopio. Para que el telescopio funcione adecuadamente se requiere que el efecto de las flexiones de la estructura, en la figura de la óptica, se mantenga dentro de un margen de error total de $75 \mu\text{m rms}$, equivalente a $1/20$ de una longitud de onda de 1.5 mm. De este margen total de error, $55 \mu\text{m rms}$ es el error permitido en el reflector primario.

6.2.1 Corrección de errores debidos a efectos gravitacionales

Generalmente, la mayor fuente de error en la superficie reflectora la provocan las flexiones de la estructura de soporte, conforme cambia la orientación, debido a la gravedad. Los primeros diseños de radiotelescopios buscaban una estructura suficientemente rígida para mantener la figura de la superficie, dentro de la fracción necesaria de la longitud de onda de operación. Sin embargo, las flexiones gravitacionales crecen rápidamente con el diámetro del telescopio haciendo este enfoque impráctico para telescopios grandes.

Para resolver este problema, Von Hoerner¹ propuso el uso de un diseño homólogo para radiotelescopios reflectores. En un diseño homólogo la estructura no se optimiza para minimizar las flexiones absolutas. En su lugar, se optimiza para minimizar las flexiones de una parábola ideal. En un sistema homólogo perfecto la forma del reflector siempre es parabólica para cualquier ángulo de elevación, aunque la longitud focal de la parábola puede cambiar. Como los cambios en la longitud focal del reflector primario se pueden corregir reposicionando el secundario, tales flexiones prácticamente no tienen efecto en el desempeño del telescopio. Los telescopios reales no pueden alcanzar una homologación perfecta, pero un diseño apropiado puede reducir los errores en la superficie efectiva por un factor mayor de cinco.

Mientras que por muchos años los telescopios se han diseñado usando el principio de homologación, tal enfoque no es suficiente para el GTM. Las flexiones del espejo primario conforme cambia el ángulo de elevación del cénit al horizonte son del



FIGURA 6.2. Prototipo de un segmento de níquel del Gran Telescopio Milimétrico. En su mayoría, los paneles están formados por ocho subpaneles.

orden de varios milímetros. Aun así las desviaciones respecto al mejor ajuste a la parábola ideal son de algunos cientos de micrómetros rms. Como tales cantidades son mucho mayores que el margen de error para el reflector primario, se requirió un nuevo enfoque.

Se diseñó un sistema activo, es decir, un sistema que permite modificar la posición de los paneles individuales, de tal forma que las flexiones se pueden corregir continuamente mediante una computadora. Dicho enfoque permite que la estructura sea optimizada para un peso y una rigidez dada, en lugar de para un homólogo, y hace que el requerimiento de mantener la posición del reflector pase de una estructura pasiva a un sistema de control activo.

La superficie del reflector primario está dividida en 180 segmentos distribuidos en cinco anillos. El primer anillo tiene 12 segmentos, el segundo tiene 24 y los tres restantes tienen 48 cada uno. En el concepto de la superficie activa del GTM cada segmento está sostenido por cuatro actuadores lineales, uno en cada esquina. Debido a

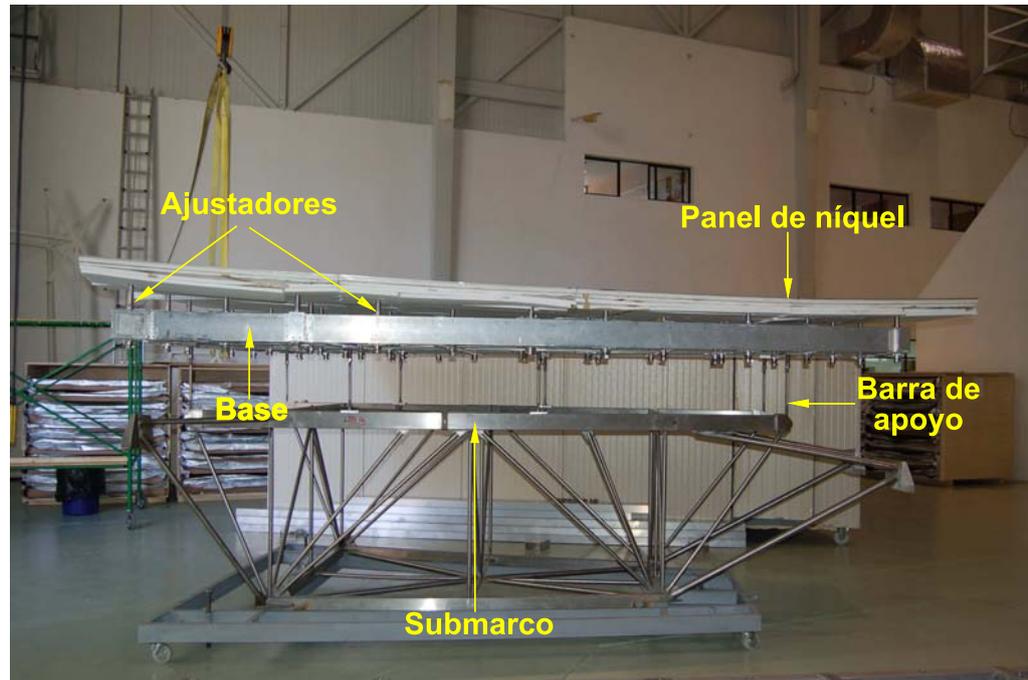


FIGURA 6.3. Imagen de un segmento de pruebas del GTM en el laboratorio de superficies anesféricas del INAOE. El panel de níquel está montado sobre una base, que a su vez está soportada por el submarco, o subestructura abierta, mediante ocho barras de apoyo. El submarco tiene cuatro actuadores para ajustar la orientación del panel respecto a la estructura del telescopio.

la alta precisión requerida en la superficie, no es práctico compartir actuadores entre segmentos. Mientras que lo anterior resulta en un número relativamente grande de actuadores, 720 en total, tiene la ventaja de que la posición de cada segmento se puede controlar individualmente.

En principio, con sólo tres actuadores se puede posicionar un segmento. No obstante, la forma aproximadamente trapezoidal de los segmentos requiere un soporte más uniforme. Se diseñó una estructura de soporte, llamada submarco, que se fija al segmento por medio de los cuatro actuadores. El submarco, a su vez, sostiene la superficie del panel en ocho puntos interiores. El soporte de cuatro puntos también permite ligeros ajustes de alabeo para compensar errores residuales.

El GTM usará una corrección de lazo abierto para mover los actuadores a la posición adecuada, como función del ángulo de elevación. Será el primer telescopio

de su tipo que dependerá de una superficie activa para alcanzar las especificaciones operativas. Como tal, representa una innovación en la tecnología de estructuras flexibles de alta precisión para telescopios milimétricos y radiotelescopios.

6.2.2 Corrección de errores inducidos térmicamente

Otra fuente importante de errores en la superficie del reflector primario son los efectos térmicos en la estructura de soporte. De manera similar al caso de los errores gravitacionales, los inducidos térmicamente aumentan conforme crece el diámetro del telescopio. El enfoque tradicional para contrarrestar los errores inducidos térmicamente ha sido minimizar las variaciones de temperatura pasivamente. Lo anterior se logra recubriendo la estructura con una pintura altamente reflejante, cubriendo el reflector con un aislante y haciendo circular aire dentro del volumen encerrado.

El GTM hará uso de todas las técnicas tradicionales, pero además, como el telescopio tendrá una superficie activa, podrá corregir los errores inducidos térmicamente en la superficie. Para lograrlo, se instalarán más de 100 sensores de temperatura en distintas posiciones del reflector. Las lecturas de estos sensores se usarán para calcular los cambios requeridos en la posición de los actuadores y así corregir la figura del reflector, dado el estado térmico de la estructura. En vista de que la constante de tiempo térmica de la estructura es muy grande podemos garantizar que tales correcciones serán lentas.

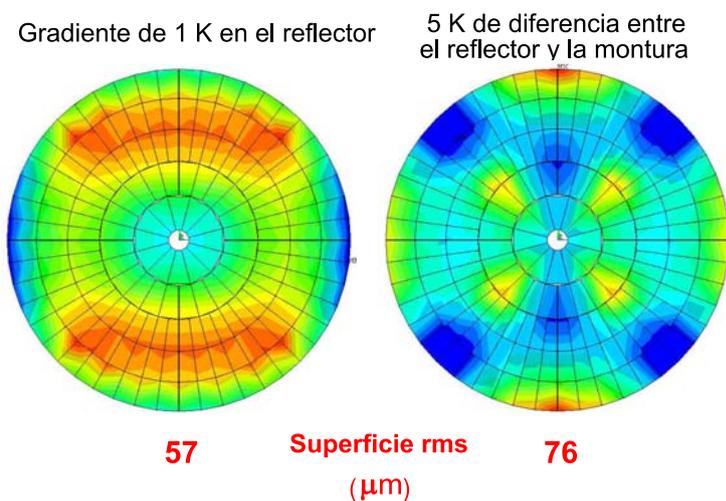


FIGURA 6.4. Distorsiones térmicas de la superficie del GTM, para dos gradientes de temperatura. [D. Smith, MER-LAB/GTM].

La determinación experimental de las correcciones térmicas es más complicada que en el caso de la carga gravitacional. No obstante, la relación inicial entre cada elemento sensor y la posición del actuador requerido se calculará por medio de un modelo de elementos finitos de la estructura del telescopio. Se espera reducir los errores térmicos por un factor de 2 mediante una corrección de lazo abierto.

6.2.3 Corrección de errores debidos al viento

Cuando el telescopio esté operando, la fuente más importante de errores en el primario será el viento. Este efecto se traduce en un problema de apuntado. El enfoque tradicional para alcanzar la precisión de la superficie sometida a cargas de viento depende de la rigidez de la estructura. Los análisis indican que la precisión de la superficie del GTM se puede mantener dentro del margen de error sin corrección adicional. Por otro lado, como se tiene una superficie activa, en principio es posible hacer correcciones para la componente estacionaria del viento.

6.3 Apuntado del telescopio

El problema más difícil en el diseño y operación del Gran Telescopio Milimétrico será alcanzar la precisión requerida en el apuntado. El diámetro del haz del telescopio a 250 GHz es de 6 seg de arco, por lo que la especificación en la precisión del apuntado es de 1 seg de arco, con la meta de llegar a 0.6 seg de arco. Se trata de un requerimiento difícil de alcanzar porque la gran área colectora del telescopio, de alrededor de 2 000 m², hace las veces de una vela de cara a los vientos incidentes, lo que provoca que el telescopio sea más susceptible a errores de apuntado. Por otro lado, la frecuencia natural de la estructura es baja, lo que dificulta mantenerla en la posición deseada en presencia de cargas de viento.

Para alcanzar un buen apuntado se deben medir y compensar los errores de apuntado repetibles y estáticos usando un modelo que se construye a partir de una tabla de errores. La tabla se genera siguiendo una fuente astronómica y comparando continuamente la posición del telescopio con la posición deseada. Los datos resultantes se ajustan a un modelo, que aplica una corrección adecuada en cada posición. No obstante, se espera que los errores residuales, después de aplicar el modelo de apuntado global, aún sean mayores que el margen total de errores, debido

a la resolución limitada de los datos del modelo, así como a las variaciones en las condiciones ambientales durante las medidas de apuntado.

El modelo de apuntado básico será complementado con un procedimiento estándar de verificación local. Tales correcciones requieren usar una fuente de apuntado cercana para hacer una corrección adicional, antes de mover el telescopio a la posición deseada. La gran área colectora del GTM, y de ahí su gran sensibilidad, garantizan que se encontrarán fuentes de apuntado locales. Las correcciones adicionales contribuyen además a eliminar la mayoría de los errores de apuntado inducidos térmicamente.

Para extender el tiempo requerido entre dos verificaciones de apuntado, el diseño incluye una red de varios cientos de sensores de temperatura, que forman parte del sistema de compensación flexible. Los sensores realizan un seguimiento de la temperatura de la plataforma de rotación, o alidada, y de las patas del cuadropodo, para llevar a cabo el cálculo de la deformación de la estructura. Inicialmente, las correcciones serán comparadas con las predicciones del modelo de elementos finitos. A largo plazo se desarrollará una tabla de error que correlacionará las lecturas de los sensores de temperatura con las correcciones de apuntado.

Las deformaciones estructurales son más difíciles de corregir porque no hay una medida directa del error. Para corregir tales deformaciones, además de los sensores de temperatura, el sistema de compensación incluye inclinómetros biaxiales en cada balero de elevación, un telescopio óptico cerca del reflector primario y un sistema adicional de seguimiento directo de la posición del reflector secundario, basado en un láser. El objetivo es combinar la información de todos los sensores para generar correcciones adicionales en tiempo real, cuando ocurran cargas de viento. Los sensores permitirán un seguimiento directo y una comparación con los errores de posición en el cielo y con aquellos predichos por el sistema de compensación. Se espera que, con el tiempo, el nivel de corrección aumente.

Mantener los codificadores dentro de la precisión requerida exige que el desempeño del sistema de control sea mucho mejor que el de telescopios estándar. El sistema de control del GTM² ha aplicado varias de las técnicas más avanzadas, desarrolladas por el grupo de control del proyecto Deep Space Network del JPL. Los experimentos en dichas antenas han mostrado la factibilidad de usar controladores basados en modelos. Las simulaciones indican que los errores medidos en los codificadores se pueden corregir hasta una fracción de segundo de arco, aun en el caso de ráfagas de viento.

6.4 El sistema de control y seguimiento

Los telescopios modernos son sistemas distribuidos complejos que consisten en dispositivos e instrumentos que deben ser controlados en un esquema coordinado para realizar tareas científicas, como es la adquisición de datos astronómicos. Se debe, por lo tanto, dar seguimiento en tiempo real al estado de todos los dispositivos. Para el GTM se ha diseñado un sistema de programación generado automáticamente. El sistema se ha beneficiado de los avances en la tecnología de la computación para el desarrollo de los programas de control e integración de dispositivos nuevos.

6.4.1 Enfoque general

El enfoque tradicional para crear un sistema de control y seguimiento ha sido desarrollar controladores de dispositivos individuales y después ponerlos en un sistema de cliente/servidor para llegar a la coordinación deseada. Los problemas en este enfoque son la complejidad y la inflexibilidad. Los protocolos de comunicación deben ejecutarse y mejorarse y las adiciones requieren modificaciones del código e incluso cambios en el diseño.

El GTM ha automatizado la creación de un esquema de control y seguimiento describiendo las componentes del sistema en lenguaje extensible XML y después generando *automáticamente* el código fuente para clases base extensibles e interfaces de usuarios. El diseño del sistema de control y seguimiento es flexible y adaptable.

Para simplificar el mecanismo de coordinación de los diferentes subsistemas se ha empleado un sistema de estado global en el modelo de comunicación. Un solo objeto de estado global, que contiene referencias a todas las componentes del sistema, se describe en XML, y el código fuente correspondiente se crea automáticamente para acceder a objetos de estado global. El uso de XML en astronomía se inició con los trabajos realizados en el Goddard Space Flight Center de la NASA.³

6.4.2 Diseño orientado a objetos y automatización

El GTM consta de un gran número de sistemas complejos de control: el servosistema de los ejes principales, con 16 motores en acimut y cuatro motores en elevación; el posicionador del reflector secundario; los 720 actuadores de los paneles de la

superficie activa y la óptica del terciario. Además, el GTM tiene instrumentos científicos como los receptores, los espectrómetros y los sistemas de adquisición de datos.

Ya que los sistemas de los telescopios están restringidos al mundo de los objetos reales, un diseño orientado a los objetos para el sistema de control y seguimiento se sigue de manera natural. Cada subsistema se puede definir como un objeto de programación con atributos que describen las propiedades de los objetos reales y los métodos que alteran el estado de estos atributos.

El XML genera la automatización deseada por medio de un conjunto de reglas para estructurar los datos, como una hoja de cálculo, direcciones y parámetros de configuración. Esto simplifica las tareas de la computadora de generar y leer datos, y asegura que la estructura de los datos no sea ambigua. Las propiedades de cada subsistema del telescopio se especifican en un archivo de configuración XML. Cada uno de estos archivos describe una clase, que incluye tipos de campo y métodos de acceso. Dichos archivos son procesados para generar automáticamente clases base extensibles, métodos de comunicación en C++ y Java, y definiciones en el lenguaje de datos interactivo IDL para generar códigos de comunicación en la arquitectura de objetos comunes CORBA.

Usando los protocolos estándar IIOP, un programa basado en CORBA de cualquier proveedor, en casi cualquier computadora, sistema operativo, lenguaje de programación y red, puede interactuar con otro programa basado en CORBA del mismo o de otro proveedor, en casi cualquier computadora, sistema operativo, lenguaje de computación y red.

El compilador de control y seguimiento XML del GTM es una herramienta de programación tal que, dado un conjunto de archivos de configuración, crea clases base extensibles e interfaces de usuarios, formando un marco de trabajo para el control y seguimiento. El compilador procesa los archivos de configuración y genera clases base en Java, en C++, en la interfaz nativa de Java JNI y en CORBA. Java es el lenguaje que se usará para las interfaces con los usuarios.

En resumen, las clases base en Java se usan para manejar la interfaz de usuario en Java y las clases base en C++ controlan los manejadores de dispositivos de sistemas de tiempo real y los controladores. Las clases en JNI permiten la comunicación entre las clases en Java y las clases en C++ en el área de red local. Las clases en CORBA permiten la comunicación entre las clases en Java y en C++ entre computadoras. Además, el compilador crea un solo objeto en Java y en C++ que

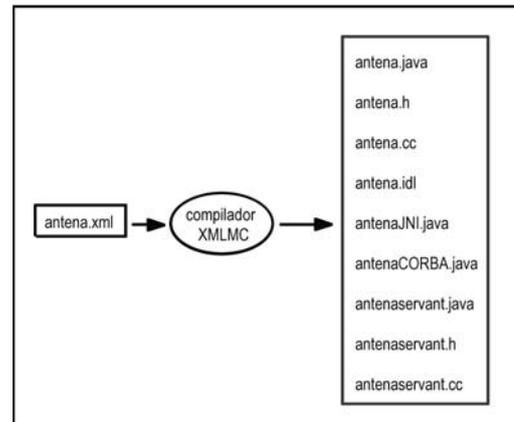


FIGURA 6.5. Diagrama de flujo del compilador de control y seguimiento del GTM.

contiene referencias a todos los elementos del sistema para realizar un diagnóstico del sistema global.

Para garantizar una apariencia consistente del sistema de control y seguimiento del telescopio se usa un conjunto de archivos de configuración para describir la interfaz de usuario y la salida de los paneles de control y seguimiento.

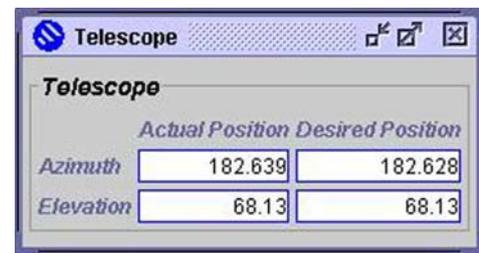


FIGURA 6.6. Una muestra del menú de control del GTM en la pantalla de la computadora.

6.4.3 Sistema de estados globales

Este sistema se usa para facilitar el acceso de las componentes de distintos sistemas y simplificar el protocolo de comunicación. Cada subsistema declara su estado en el sistema global y de ahí toma el estado de otro subsistema. Un controlador del secuenciador de estados finitos coordina las actividades entre los diferentes subsistemas por medio del mismo sistema global. El único requerimiento para hacer este

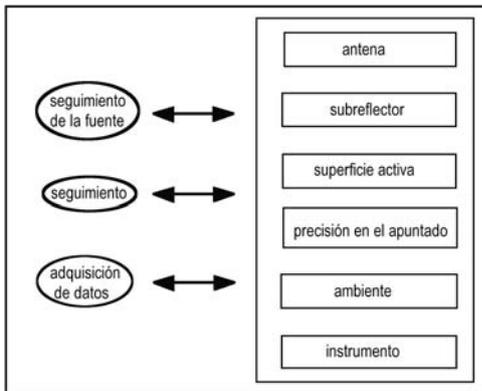


FIGURA 6.7. Enfoque de estados globales.

enfoque factible consiste en que para cada elemento del sistema global sólo puede existir un escritor. Esto asegura que dos o más procesos no pueden inscribirse simultáneamente o actualizar un elemento dado. Por otro lado, un número ilimitado de lectores puede acceder al mismo elemento del sistema global.

En un sistema de computación distribuido, como es el caso del GTM, se usa un esquema de memoria compartida replicada. Se instalan tarjetas de memoria individual en cada sistema y se interconectan usando una conexión de fibra óptica. Todo lo escrito en una de las memorias se manda instantáneamente a todas las tarjetas de memoria replicada de la red. Cuando no hay acceso directo a la memoria compartida, como en el caso de las observaciones remotas, se usa un servidor CORBA para tener acceso a la memoria.

Elegir el ambiente computacional idóneo para el GTM fue una tarea difícil. La elección final fue usar un sistema de anfitrión/objetivo: una estación de trabajo que corre en Solaris y una poderosa computadora personal Motorola basada en el canal de datos VME, embebida en un sistema operativo Vxworks, que es el sistema operativo de tiempo real más avanzado. Tal elección ofrece la ventaja de disponer de una conversión directa entre Unix y Vxworks, así como una gran disponibilidad de controladores de dispositivos en ese ambiente.

6.4.4 Sistema de control y seguimiento del GTM

El sistema descrito hasta ahora se ha usado para construir el sistema de control y seguimiento del telescopio, que está compuesto de varios módulos que incluyen

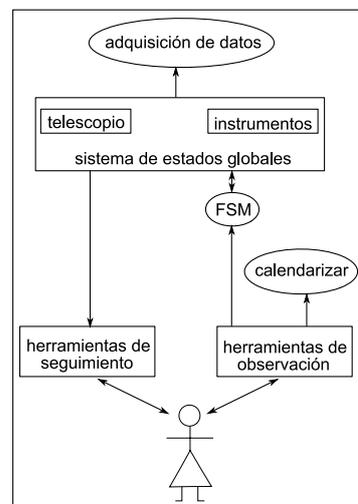


FIGURA 6.8. Diagrama de bloques del sistema de control y seguimiento.

herramientas de observación y seguimiento, un controlador del secuenciador de estados finitos y un calendario, entre otros.

Las herramientas de observación permiten al usuario diseñar programas de observación. Tales programas se pueden ejecutar en línea o se pueden enviar a un agendador para una ejecución óptima. También se puede guardar o cargar un archivo y se puede editar manualmente usando un editor de textos. Cada programa de observación debe contener las restricciones del tiempo de observación, las posiciones del objeto, el receptor, el instrumento y el método de observación. Las herramientas de observación generan comandos para controlar los diferentes subsistemas basados en el programa de observación. También se pueden usar para generar comandos de una manera más interactiva con propósitos tanto científicos como de ingeniería.

Las herramientas de observación pueden, asimismo, ejecutar funciones como apuntar a una fuente, desplazarse teniendo como referencia la fuente, controlar los radiómetros, modificar el modo de observación y el tiempo de integración. También dan acceso a funciones de ingeniería como el control de la antena, del reflector secundario, del terciario y de los instrumentos. Se dispone de otros recursos para el usuario tales como catálogos de objetos en línea, condiciones meteorológicas, ayuda, mapas de configuración y una estimación de los tiempos adicionales requeridos para llevar a cabo la tarea principal. Un controlador del secuenciador de estados finitos traduce los programas de observación en estados del telescopio y de los

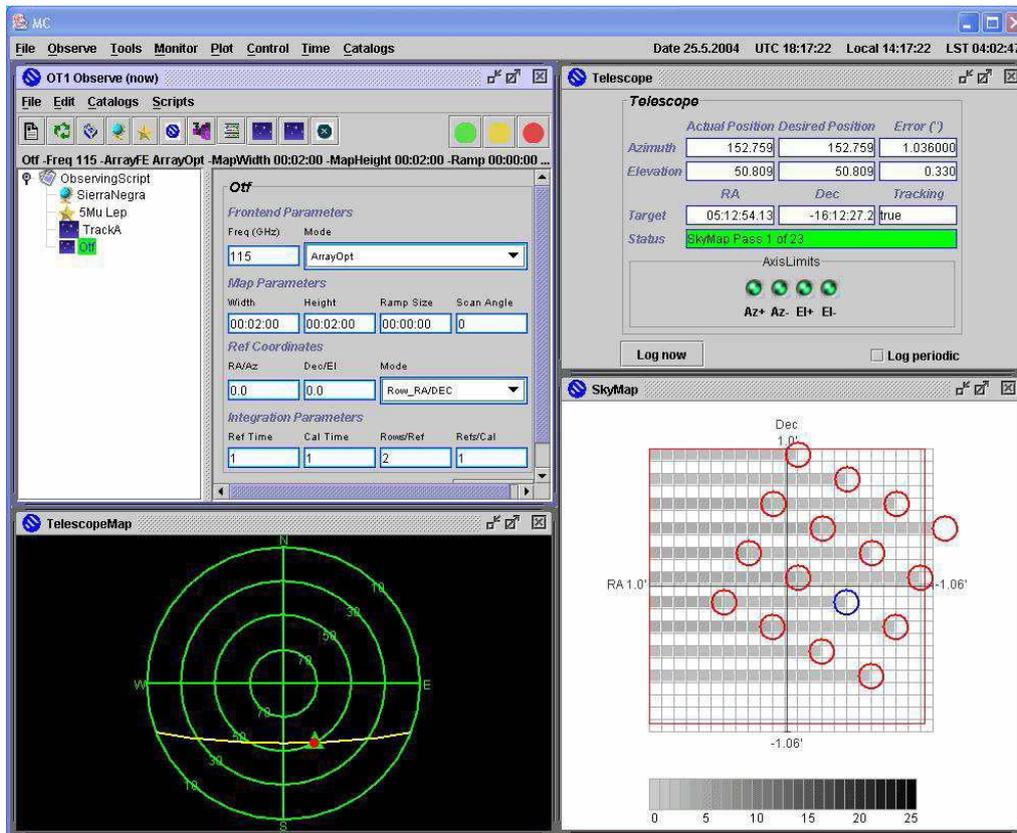


FIGURA 6.9. Interfaz del usuario en el sistema de control y seguimiento del GTM.

instrumentos. Ejecuta cada comando mientras le da seguimiento al estado de error del sistema.

Las herramientas de seguimiento se usan para ver el estado del sistema en tiempo real mientras se ejecutan los comandos de observación y se adquieren los datos científicos y de ingeniería. Su función es ejecutar una verificación de la integridad de los datos y de la operación adecuada del sistema, desplegando el estado del sistema al usuario. La información puede incluir, por ejemplo, el estado de observación indicando la etapa en curso, el tiempo transcurrido y el tiempo restante. También indica el estado del telescopio: posición y temperatura, entre otros parámetros. Incluye además el estado del instrumento, como la configuración, el ancho de banda y la tasa de muestreo. Asimismo, informa sobre el estado del modelo de apuntado,

el estado de la superficie activa, el estado del subreflector, las condiciones meteorológicas, las señales de error y las bitácoras.

6.4.5 Adaptación a telescopios existentes

Como preparación al lanzamiento del sistema de control y seguimiento del GTM se han construido, y en algunos casos actualizado, diversos sistemas para probar su arquitectura. Los resultados han demostrado la adaptabilidad y reusabilidad del sistema. Como una primera aproximación para verificar la operación del sistema se desarrolló un simulador del telescopio que reproduce el comportamiento del telescopio real y de los instrumentos. Disponer de un simulador permite, además, enseñar el funcionamiento del sistema a los futuros usuarios.

Los programas y toda la electrónica SUN-Solaris/VME-PC se han instalado para uso regular en el Infrared Optical Telescope Array, ubicado en Mount Hopkins, Arizona, y en el telescopio de 14 m del FCRAO. El sistema está funcionando exitosamente en dichos telescopios.

6.5 La máquina de medición por coordenadas

Con el apoyo del proyecto GTM, el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica construyó una máquina de medición por coordenadas, para llevar a cabo metrología dimensional de piezas de gran tamaño, como son los paneles del telescopio y el reflector secundario. Se trata de una máquina de pórtico: un puente deslizante de 8.5 m de largo está sostenido, en cada extremo, por dos rieles paralelos de 10 m de longitud. Una plataforma deslizante horizontal se mueve a lo largo del puente. El movimiento combinado del puente y la plataforma permite posicionar un palpador en un plano horizontal x,y . El movimiento del palpador en la dirección vertical (z), lo provee un pilar deslizante que es soportado por la plataforma. El movimiento de la máquina se efectúa mediante un mecanismo de corona y piñón con precargas activas, que se aplican vía motores de corriente directa, acoplados en pares. El puente y el husillo usan cuatro motores cada uno, mientras que la sección vertical usa sólo dos motores. El control de la máquina usa códigos G, que son estándares en las máquinas de control numérico, provistos por la computadora de control que corre bajo el sistema operativo Hard en tiempo real.

El volumen de medida de la máquina es de aproximadamente de 5 m por 6 m horizontales por 4 m verticales. El peso máximo del objeto de prueba es de 30 toneladas. La posición aproximada de la máquina se puede obtener vía codificadores rotatorios en cada motor. No obstante, la operación normal de la máquina usa tres transductores de desplazamiento, lineales y ortogonales, que son interferómetros ópticos, para obtener la posición de la cabeza medidora con una resolución de menos de $1 \mu\text{m}$.



FIGURA 6.10. La máquina de medición por coordenadas en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

La máquina de medición cuenta con diversos palpadores para llevar a cabo las medidas. El de desplazamiento lineal permite hacer medidas de hasta 100 mm, en la dirección vertical, cuando está instalada en la cabeza posicionadora. Se usa para un barrido continuo de la superficie, con la punta en contacto permanente con la superficie. La información de las coordenadas de los tres interferómetros (X,Y,Z) y del palpador Z se combinan en intervalos de tiempo programables, mientras se hace el barrido sobre la superficie de prueba. El barrido continuo es ideal para medir superficies ópticas grandes como los espejos de un telescopio, en las que la figura de la superficie es generalmente más importante que cualquier detalle de construcción.

También se cuenta con un palpador convencional tridimensional, que se usa cuando los objetos no requieren medidas continuas, es decir, cuando se quieren localizar los rasgos característicos de la pieza de trabajo o cuando el barrido continuo pueda dañar la superficie.

Todas las medidas de prueba se han hecho en modo continuo usando el palpador de desplazamiento lineal. El contacto continuo con la superficie de prueba y el registro de los datos resultan en un error de hasta 20 μm rms, para todas las superficies medidas, excepto superficies de vidrio pulido. También se han llevado a cabo medidas con palpadores de disparo. El uso de este tipo de palpadores ha facilitado la comparación con otras máquinas y ha ofrecido la ventaja adicional de que el error típico ha disminuido hasta 12 μm rms.

La máquina de medición por coordenadas fue diseñada y construida completamente por personal y estudiantes de posgrado del instituto. Como resultado, se ha desarrollado un conocimiento básico de metrología de gran escala. Asimismo, ha representado una oportunidad para preparar a estudiantes de posgrado e ingenieros de alto nivel. La máquina hace uso de conceptos estándares de ingeniería. No obstante, el volumen tan grande ha requerido el desarrollo de técnicas novedosas especializadas para su caracterización y calibración. Empezó a operar en 2003 y ha estado sujeta a un programa de mejoramiento continuo que la ha transformado en un proyecto de investigación e ingeniería del instituto. En México, el acceso a máquinas de medición por coordenadas está limitado a unos cuantos instrumentos de tamaño pequeño a intermedio. Sin duda, la máquina de medición cubrirá la demanda de medidas precisas de las dimensiones de piezas grandes.

En el campus del instituto se construyó un laboratorio especial para albergar la máquina de medición por coordenadas, que también aloja la gran máquina de pulido. La máquina de pulido puede rectificar y pulir los moldes del reflector secundario

que usan materiales compuestos, como la fibra de carbono, o bien puede tallar tejos de espejos de hasta 8 m de diámetro. El sistema de aire acondicionado del laboratorio en combinación con el aislamiento térmico del edificio mantienen las variaciones de temperatura dentro de 1°C de pico a pico.

6.6 Desarrollo de instrumentos

Entre los avances tecnológicos más innovadores propiciados por el GTM se encuentra el desarrollo de sistemas receptores de frontera. Los instrumentos astronómicos son sistemas únicos construidos especialmente para cubrir una necesidad específica de investigación. Debido a que el objetivo principal es la recepción y medida de señales extremadamente débiles provenientes, por ejemplo, de galaxias que se formaron en el Universo temprano, se requiere el desarrollo de nuevas tecnologías mediante la interacción de especialistas en distintos campos de la física e ingeniería. Muchas veces dichos desarrollos han llevado a la creación de empresas que utilizan las nuevas tecnologías con propósitos comerciales, contribuyendo de esta manera al beneficio de la sociedad.

Tanto el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica como la University of Massachusetts Amherst cuentan con grupos de científicos instrumentistas. El proyecto GTM ha sido muy exitoso en la fabricación de sistemas de receptores extremadamente sensibles; algunos de ellos ya están funcionando en el telescopio de 14 m del FCRAO. Los instrumentos desarrollados y planeados para el Gran Telescopio Milimétrico se describen en el siguiente capítulo.

Referencias

- [1] Von Hoerner, S. (1967), "Design of Large Steerable Antennas", *Astron. J.* **72**, 35.
- [2] Gawronski, W. y Souccar, K. (2004), "Control System of the Large Millimeter Telescope", *Proc. SPIE* **5495**, 104.
- [3] Ames, T. *et al.* (2000), "Using XML and Java for Telescope and Instrumentation Control", *Proc. SPIE* **4009**, 2.

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 telescopio es de casi 2 000 m², 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 ensamblajes 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 GBT, CARMA, Spitzer, Hubble y otros programados a futuro como el interferómetro ALMA, el proyecto Herschel y el telescopio espacial James Webb.

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 del continuo, heterodinos y espectrómetros. Asimismo, se mencionan los planes para la siguiente generación de instrumentos.

7.2 Primera generación de cámaras del continuo

En la actualidad, una de las características científicas más innovadoras de los telescopios milimétricos es el uso de ensambles 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 ofrece 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 contiene un ensamble de 144 bolómetros diseñado para hacer imagen profunda, de campo grande. La cámara de distribuciones espectrales de energía SPEED, es una matriz de cuatro pixeles. Cada pixel puede observar simultáneamente en cuatro 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

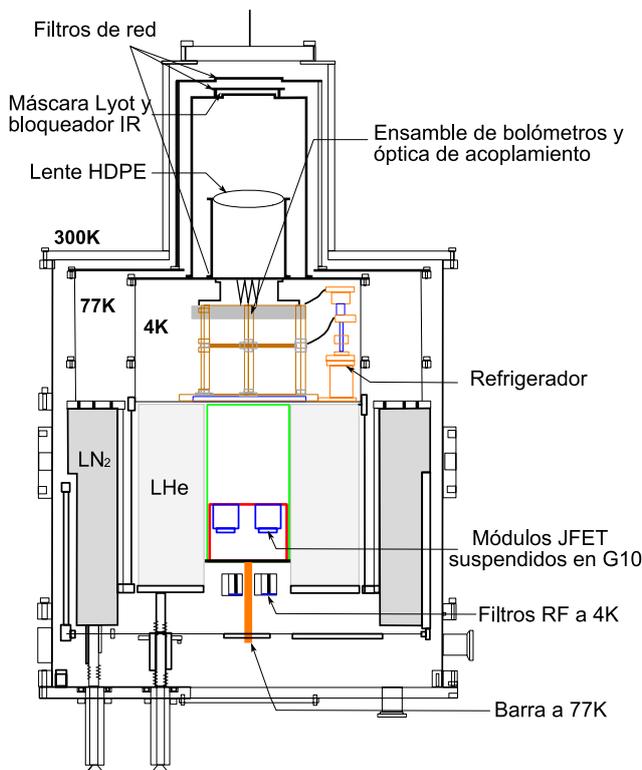
AZTEC, acrónimo de Astronomical Thermal Emission Camera, es un ensamble de bolómetros desarrollado en la University of Massachusetts Amherst, en colaboración con el equipo que construyó la cámara BOLOCAM,¹ en el que participaron miembros del Caltech, el JPL, la University of Colorado y la University of 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 ensamble de detectores comprende 144 bolómetros de nitrato de silicio, tipo micromalla, fabricados en la misma oblea de silicio, que opera a 1.1, 1.4 y 2.1 mm. No obstante, sólo una de estas bandas estará disponible por temporada de observación. Los bolómetros se enfrían 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



FIGURA 7.1. Imagen de un cúmulo de galaxias a $z = 0.7$, tomada por el observatorio de rayos X Chandra. Se ha propuesto observar este cúmulo con la cámara de emisión térmica AZTEC. [D.Q. Wang, University of Massachusetts Amherst y NASA/CXC/SAO].

FIGURA 7.2. Diagrama de la sección transversal del criostato de AZTEC, donde se muestra la electrónica fría. [G. Wilson, University of Massachusetts Amherst/FCRAO].



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

Se diseñó un nuevo criostato de aluminio que consta 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 de acuerdo con el protocolo AES/EBU para mandar y 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.² 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 con 2 mm de vapor de agua precipitable, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 7.1.

Como la cámara AZTEC ya está terminada será instalada temporalmente en otros telescopios. En junio de 2005 se llevó a cabo una exitosa temporada de pruebas en el telescopio James C. Maxwell, en Hawai.

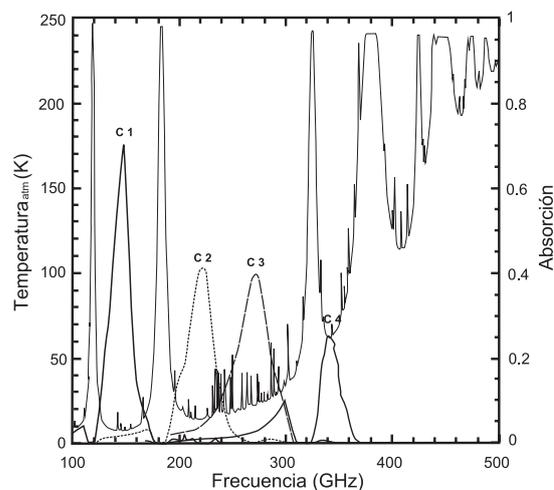
7.2.2 SPEED

La cámara SPEED, acrónimo de Spectral Energy Distribution Camera, es capaz de observar cuatro bandas de frecuencia simultáneamente.³ Se trata de un proyecto

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

TABLA 7.1. Sensibilidades y parámetros ópticos para la cámara bolométrica AZTEC cuando funcione en el GTM a 1.1 mm, con las suposiciones descritas en el texto. [G. Wilson, University of Massachusetts Amherst/FCRAO].

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. [G. Wilson, University of Massachusetts Amherst/FCRAO].



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 la University of Massachusetts Amherst en colaboración con el Goddard Space Flight Center de la NASA y la University of Chicago.

La cámara está configurada como una matriz de 2 por 2 elementos de imagen o píxeles, donde cada uno alberga cuatro 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 multifrecuencia 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 dicróicos.

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 bicapa de molibdeno/oro. Se enfrían a 250 mK vía un refrigerador de ^3He . Se polarizan a la región de transición, aplicando una corriente a través de una resistencia en paralelo con el sensor. Una retroalimentación electro térmica fuerte mantiene el superconductor en la región de transición y casi isotérmico.

La caracterización de los detectores prototipo llevada a cabo en la University of Massachusetts Amherst y en el Goddard Space Flight Center ha demostrado la repetibilidad del proceso de creación de sensores superconductores polarizados por voltaje con las características adecuadas. La cámara SPEED tiene 16 sensores de este tipo, que se leerán por medio de un multiplexor superconductor de 1 por 8, desarrollado en el National Institute of Standards and Technology. Aunque la multiplexación no es crítica con sólo 16 detectores, se está desarrollando la infraestructura 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 la cámara 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.

TABLA 7.2. Sensibilidad calculada para SPEED cuando funcione en el GTM, con las suposiciones descritas en el texto. [G. Wilson, University of Massachusetts Amherst/FCRAO].

| <i>Canal</i> | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
|--|----------|----------|----------|----------|
| 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 de ruido [mJy/ $\sqrt{\text{Hz}}$] | 0.93 | 1.50 | 1.83 | 3.26 |

El instrumento 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. Las cámaras 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, acrónimo de Second Quabbin Optical Imaging Array, es una cámara criogénica diseñada para funcionar en el intervalo de 85 a 115.6 GHz. Tiene 32 pixeles con polarización doble dispuestos en una matriz de 4 por 4. Dos criostatos idénticos contienen 16 pixeles cada uno. Los haces de cada uno se combinan usando una malla alámbrica.

TABLA 7.3. Especificaciones de la cámara SEQUOIA cuando funcione en el GTM. [Instrumentation Laboratory, FCRAO].

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

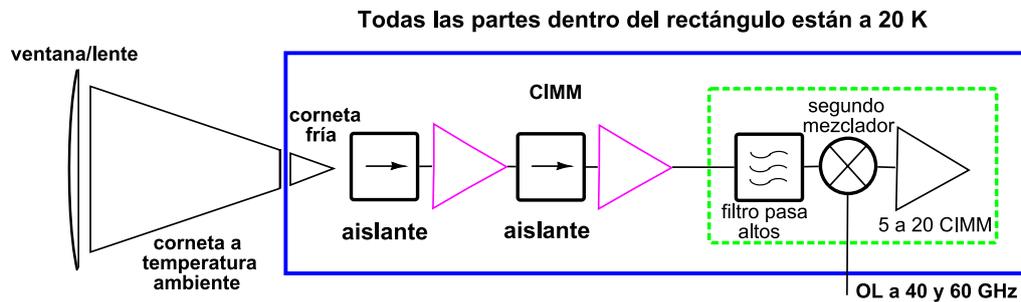


FIGURA 7.4. Diagrama de bloques de un pixel del instrumento SEQUOIA;⁴ CIMM: circuitos integrados monolíticos de microondas; OL: oscilador local.

El instrumento usa preamplificadores, que son circuitos integrados de microondas monolíticos de fosfato de indio (InP) con ganancias de 35 a 40 dB, seguidos por un mezclador subarmónico que tiene una banda de frecuencia intermedia (FI) de 5 a 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 de InP fueron diseñados en la University of Massachusetts Amherst, mientras que la oblea para la primera etapa de amplificación y la unidad de la segunda etapa se contrataron con diferentes empresas. El ruido de banda angosta puede ser tan bajo como 27 K a 100 GHz y menor de 40 K entre 85 y 115 GHz. La figura 7.6 muestra una gráfica de ruido típico.

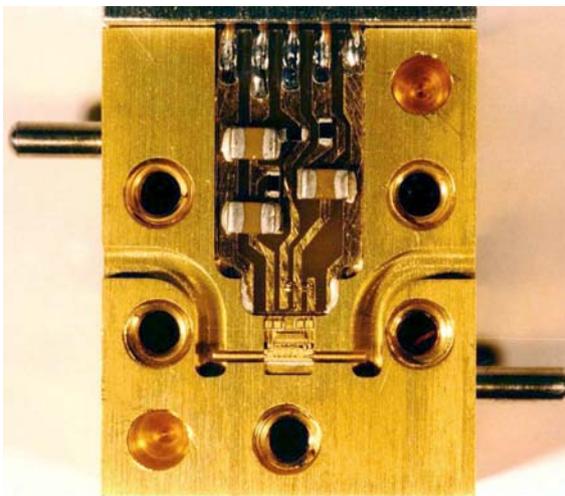


FIGURA 7.5. Vista de un preamplificador del instrumento SEQUOIA.⁴ La distancia entre la parte superior e inferior es de 3 cm.

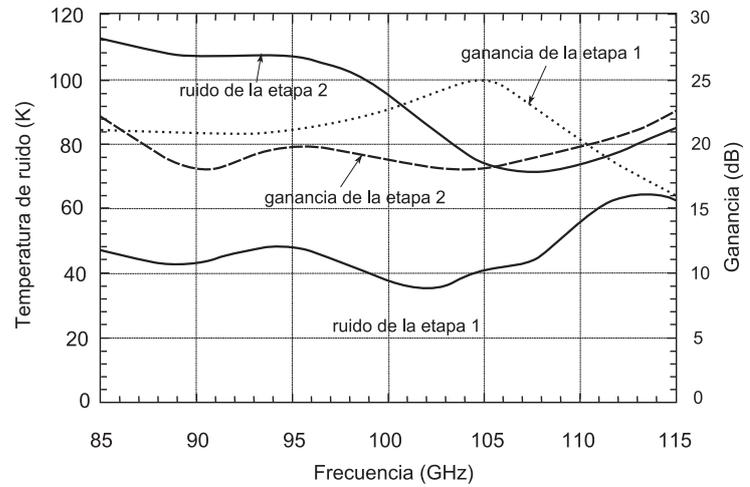


FIGURA 7.6. Temperatura de ruido y ganancia de los preamplificadores de la primera y segunda etapas del instrumento SEQUOIA. [N. Erickson, University of Massachusetts Amherst/FCRAO].

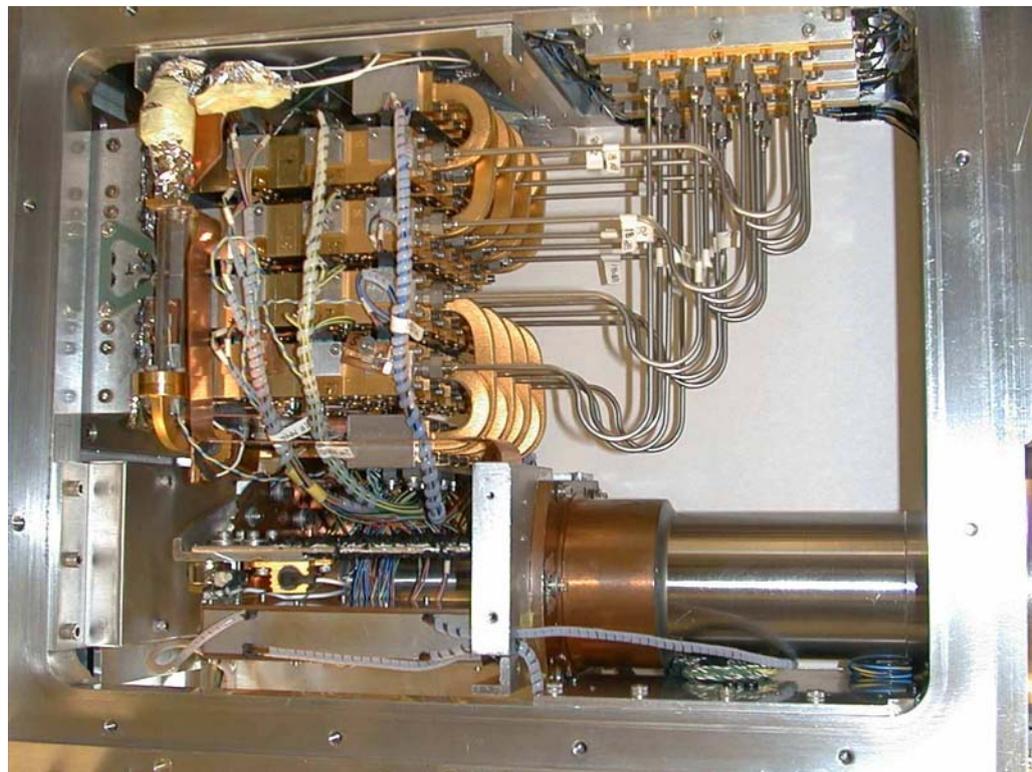


FIGURA 7.7. Detalles del interior del criostato del instrumento SEQUOIA. La altura entre la parte inferior y la superior es de 25 cm aproximadamente.

En el ensamble 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 ensambles de receptores y para este receptor la frecuencia, relativamente baja, es de gran ayuda.

Cada criostato se enfría por un sólo refrigerador con 3.5 W de capacidad de enfriamiento, a 18 K. Si bien 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. El instrumento ha estado funcionando en el telescopio de 14 m del FCRAO desde 2002 y una vez que se instale en el GTM producirá resultados inmediatos.

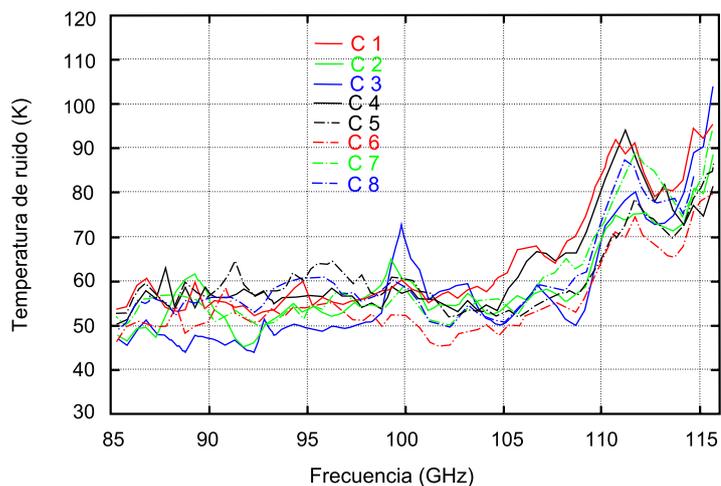


FIGURA 7.8. Temperatura de ruido para 8 pixeles del instrumento SEQUOIA. [N. Erickson, University of Massachusetts Amherst/FCRAO].

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 a partir 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. Dadas 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.

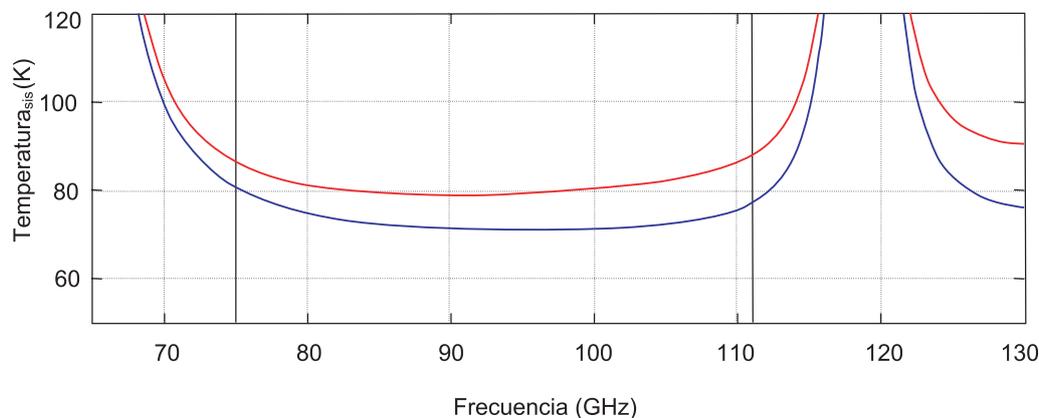


FIGURA 7.9. Temperatura de ruido en el cielo esperada para el buscador de corrimientos al rojo en condiciones de 2 mm (azul) y 5 mm (rojo) de vapor de agua precipitable, con una temperatura de ruido del receptor de 60 K. [G. Narayanan, University of Massachusetts Amherst/FCRAO].

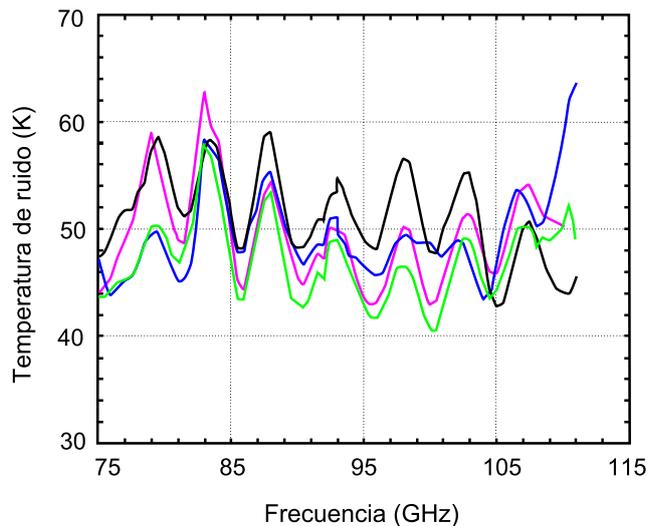


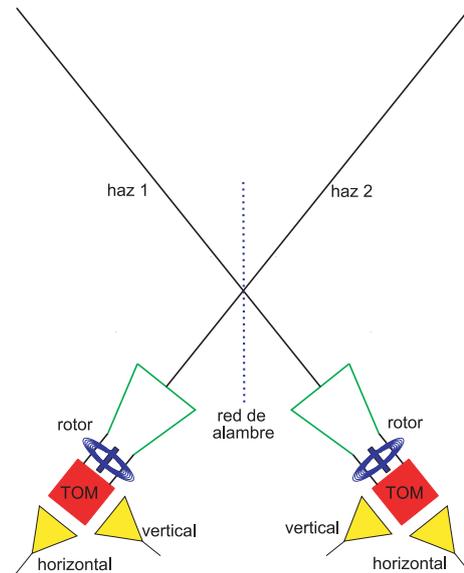
FIGURA 7.10. Temperatura de ruido del amplificador para 4 píxeles del buscador de corrimientos al rojo.

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 a 111 GHz, como se muestra en la figura 7.10. 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 en una sola corneta. Se ha desarrollado un combinador de polarización de guía de onda con muy pocas pérdidas.⁵ 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 frente a 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.

FIGURA 7.11. Esquema de los haces de entrada del buscador de corrimientos al rojo que muestra el intercambiador de haz y el transductor ortomodo, denotado como TOM.



Los cuatro receptores forman un espectrómetro de autocorrelación, con 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 5 000 canales espectrales. Esto se podría lograr con un banco de filtros, pero la complejidad y el costo serían considerables. Se desarrolló una nueva técnica usando autocorrelación analógica⁶ 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.

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

El receptor que operará en la ventana atmosférica centrada en 1.3 mm, que corresponde a un intervalo de 210 a 275 GHz, empleará detectores que están basados en tecnología de 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.

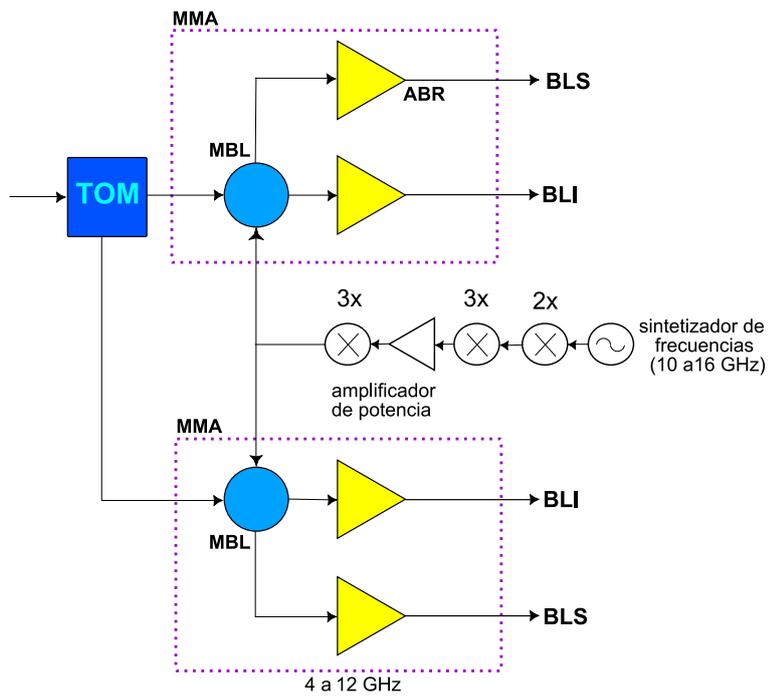


FIGURA 7.12. Diagrama de bloques del receptor de 1 mm. Los módulos mezcladores de los preamplificadores, MMA, están encerrados por líneas púrpura. TOM: transductor ortomodo; MBL: mezclador de banda lateral; ABR: amplificador de bajo ruido; BLS: banda lateral superior; BLI: banda lateral inferior. [G. Narayanan, University of Massachusetts Amherst/FCRAO].

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 ensamble de gran formato a 1 mm. La figura 7.12 muestra un diagrama de bloques del sistema. En la tabla 7.4 se resumen las especificaciones y el desempeño esperado del receptor.

| | |
|---|-----------|
| Tamaño del haz [seg de arco] | 5.5 - 7 |
| Polarizaciones | 2 |
| T_{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 |

TABLA 7.4. Especificaciones del receptor de 1 mm. [G. Narayanan, University of Massachusetts Amherst/FCRAO].

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 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 telescopio.

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 tres niveles. Los correladores ofrecen estabilidad y flexibilidad, pero el muestreo finito reduce la sensibilidad y, con ello, la razón señal a ruido.

Los correladores del GTM manejarán todas las técnicas de adquisición de datos planeadas, como intercambio de posiciones (< 1 Hz), intercambio de frecuencia (~ 1 Hz), intercambio de haces (~ 1 Hz) y cartografía instantánea (~ 10 Hz). Los requerimientos de ancho de banda y resolución están determinados por los objetivos científicos que se presentan en la figura 7.13. Los requerimientos se resumen a continuación, donde el ancho de banda y la resolución están expresados en unidades de velocidad.

TABLA 7.5. Modos de operación más comunes del espectrómetro de banda ancha. [Instrumentation Laboratory, FCRAO].

| <i>Píxeles</i> | <i>Salidas (EI/píxel)</i> | <i>Ancho de banda (MHz)</i> | <i>Canales (número)</i> | <i>Resolución (kHz)</i> |
|----------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 32 | 1 | 800 | 1 024 | 780 |
| 32 | 2 | 400 | 1 024 | 390 |
| 32 | 2 | 200 | 2 048 | 98 |
| 32 | 2 | 200 | 8 192 | 24 |
| 32 | 2 | 50 | 16 384 | 3 |

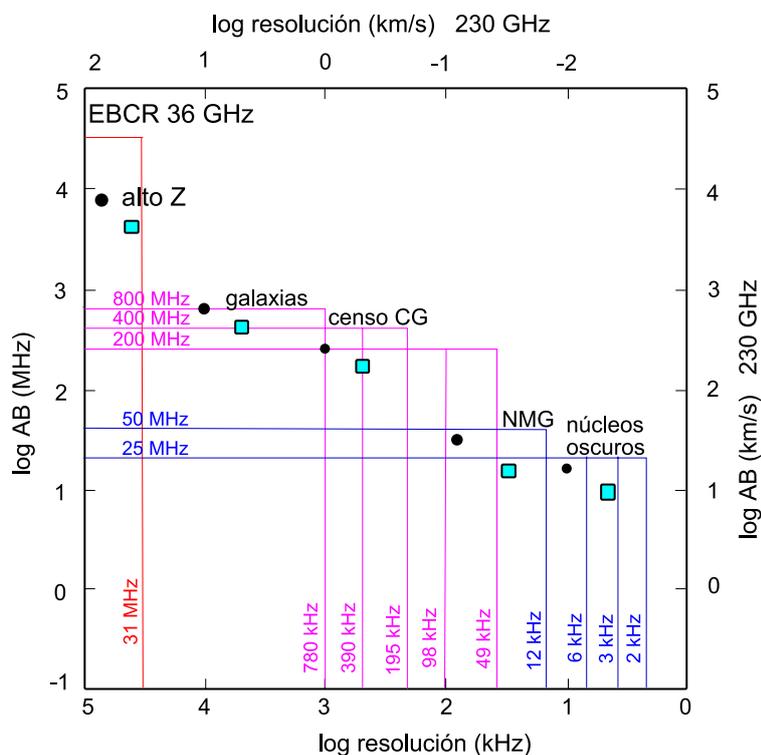


FIGURA 7.13. Requerimientos de ancho de banda y resolución para varios proyectos astronómicos, dadas las especificaciones del sistema correlador del GTM. Los requerimientos científicos se muestran con círculos y cuadrados para 1 mm y 3 mm, respectivamente; en todos los casos éstos se satisfacen por los modos disponibles del espectrómetro. ERCR: espectrómetro del receptor de corrimientos al rojo; CG: centro galáctico; NMG: nubes moleculares gigantes. [G. Narayanan y F.P. Schloerb, University of Massachusetts Amherst/FCRAO].

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

| <i>Tema</i> | <i>Ancho de banda km/s</i> | <i>Resolución km/s</i> |
|--|--------------------------------|----------------------------|
| Corrimientos al rojo de galaxias primigenias por descubrir | > 1 000 | ~ 100 |
| Imágenes extragalácticas | ~ 1 000 | ~ 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 |

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

Aun cuando la construcción de la primera generación de instrumentos está en curso, los científicos e ingenieros del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica y de la University of Massachusetts 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 en las que los avances tecnológicos tendrán alto impacto. El primero será la construcción de una matriz 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 3 600 bolómetros, lo que significa 25 veces el número de detectores de AZTEC, y ello mejoraría la capacidad de cartografía entre 12 y 20 veces. Tal instrumento se utilizaría en un gran número de proyectos científicos.

Un segundo tipo de cámara sería un ensamble de gran formato de bolómetros de frecuencia selectiva. Con este instrumento se podría estudiar la estructura interna de los cúmulos de galaxias, mediante observaciones del efecto Sunyaev–Zel’dovich. Se han establecido las especificaciones para un campo de visión de 1 por 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 una cámara que funcionará a 1 mm. El instrumento programado se llama OMAR, sigla de One Millimeter Array Receiver. Se trata de un ensamble de receptores con polarización doble, para la banda de frecuencias de 210 a 275 GHz. Estará equipada 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 campo de visión total, de 48 seg de arco. OMAR será un instrumento novedoso que definirá la frontera de los ensambles de receptores heterodinos de tipo semiconductor-aislante-semiconductor.

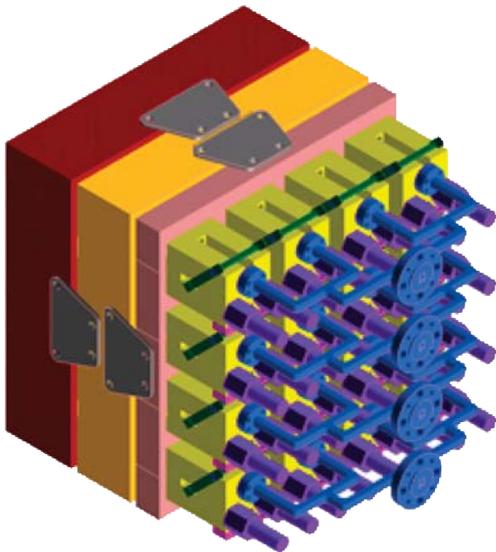


FIGURA 7.14. Modelo tridimensional del diseño de OMAR. Se trata de una cámara que funcionará a una longitud de onda de 1 mm. El ensamble completo mide aproximadamente 13 cm por lado. Se instalará dentro de un criostato y funcionará a 4 K. [G. Narayanan, University of Massachusetts Amherst/FCRAO].

Referencias

- [1] Glenn, J. (1998), "BOLOCAM: a Millimeter-wave Bolometric Camera", Proc. SPIE **3357**, 326.
- [2] Mather, J.C. *et al.* (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.
- [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.

8. Desarrollo de recursos humanos

8.1 Introducción

EL GRAN TELESCOPIO MILIMÉTRICO es un proyecto de infraestructura que simboliza la voluntad tanto de México como de Estados Unidos de explorar las fronteras del conocimiento humano. El compromiso de llevar a cabo tal exploración es crucial para estimular la imaginación de los jóvenes. Algunos de ellos elegirán carreras en ciencias e ingenierías que contribuirán al desarrollo tecnológico y económico de ambos países, por lo que las dos instituciones copartícipes han puesto un gran énfasis en los aspectos educativos de la colaboración. Además de preparar a los astrónomos que usarán el telescopio, ambas, de forma independiente, tienen programas mucho más amplios enfocados a diversas áreas de la física aplicada y de la ingeniería.

8.2 El Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

El instituto fue fundado con la misión de desarrollar investigación científica, así como formar especialistas en las áreas de astrofísica, óptica y electrónica, y posteriormente se incluyeron las ciencias computacionales. En su decreto de creación se establece que mediante las actividades de investigación y enseñanza, el instituto debe contribuir a la solución de problemas del país. Como tal, la formación de estudiantes ha sido uno de sus principales objetivos. En promedio, se tienen alrededor de 300 estudiantes de posgrado, con aproximadamente 100 investigadores y profesores en las cuatro disciplinas.

Ofrece el programa de maestría y doctorado en astronomía desde 1993; en óptica desde 1972 y 1984, respectivamente; en electrónica desde 1974 y 1993, respectivamente, y en ciencias computacionales desde 1998. Los posgrados están dentro del Programa de Fortalecimiento al Posgrado Nacional, financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). Todos los estudiantes mexicanos que son aceptados en los posgrados del instituto tienen derecho a una beca del Conacyt. El instituto tiene también estudiantes extranjeros provenientes de distintas partes del mundo, financiados por sus propios países y en algunos casos por el propio instituto.

Hasta septiembre de 2004, el instituto había otorgado 145 doctorados y 601 maestrías: 14 doctorados y 35 maestrías en astrofísica; 93 doctorados y 190 maestrías en óptica; 35 doctorados y 340 maestrías en electrónica, y tres doctorados y 36 maestrías en ciencias computacionales. Del total, 34 tesis han estado dedicadas al desarrollo de la tecnología del GTM, a la planeación de la ciencia que se llevará a cabo con el telescopio, al diseño y construcción de instrumentación en longitudes de onda milimétricas o a la investigación con telescopios milimétricos complementarios al GTM.

Es importante resaltar que es el principal instituto en México que forma astrónomos en astronomía milimétrica, y sus egresados han formado y continúan formando uno de los pilares para la explotación científica y tecnológica del GTM, del lado mexicano de la colaboración.

Aparte de los estudiantes de posgrado, el instituto tiene estudiantes egresados de universidades, tecnológicos y escuelas profesionales que realizan su servicio social, sus prácticas profesionales o sus tesis de licenciatura, bajo la supervisión de algún investigador. Ellos conforman una población flotante de 200 estudiantes, aproximadamente.

Los estudiantes egresados se han incorporado al mercado laboral con trabajos competitivos tanto en el ámbito académico como en la industria. Aquellos que regresan a la industria, lo hacen con un grado mayor de competencia, experiencia y a un nivel de responsabilidad más alto. Los egresados han tenido éxito tanto en la gerencia como en la fundación de nuevas empresas. Los que deciden quedarse en la academia, en general realizan posdoctorados en el extranjero y una buena parte de ellos se convierte en profesores o investigadores en universidades u otros centros de investigación del país. Una pequeña fracción de los estudiantes son ahora investigadores en el propio instituto.



FIGURA 8.1. Estudiantes del INAOE en el Laboratorio de Instrumentación Milimétrica, donde se está desarrollando un sistema de detección basado en un bolómetro compuesto, para medir el brillo del cielo de la Sierra Negra en ondas milimétricas.

El desarrollo de recursos humanos en astronomía y tecnología milimétrica incluye no sólo la formación en clase de estudiantes de maestría y doctorado, sino además la impartición de conferencias y cursos tutoriales. Asimismo, se tienen actividades semanales como coloquios y seminarios informales. La organización de congresos nacionales e internacionales, así como talleres enfocados a astronomía milimétrica, en combinación con las actividades mencionadas, garantizan un perfil destacado para la ciencia que se hará con el GTM en el instituto y en el ámbito de la comunidad astronómica nacional.

8.3 La University of Massachusetts Amherst

En la University of Massachusetts Amherst, el Five College Radio Astronomy Observatory (FCRAO) desempeña tres grandes funciones: investigación astronómica, desarrollo de nueva tecnología y formación de estudiantes. De los aproximadamente 85 doctorados otorgados en astronomía, desde el inicio del programa de posgrado, más de la mitad incluyen investigación en varias áreas de la radioastronomía. Los egresados han obtenido trabajos en observatorios, han dirigido departamentos de astronomía y han tenido puestos de docencia o investigación en Estados Unidos, México, Canadá, Colombia, Francia, Alemania, Holanda, Japón, China y Corea. En Estados Unidos, varios egresados trabajan en la NASA, el NRAO, el JPL, el CFA, la NSF, el STSCI, el SETI Institute, la industria aeroespacial y en universidades enfocadas a las artes y humanidades. La diversidad es aún más impresionante si uno incluye los investigadores jóvenes asociados, que han sido formados en el FCRAO. Tal programa de posdoctorado es esencial para una carrera profesional moderna en astronomía o en física.

La investigación y la educación en áreas estrechamente ligadas al GTM también tiene lugar en otros departamentos de la universidad, como es el caso del Department of Electrical and Computing Engineering. El departamento incluye el Microwave and Remote Sensing Laboratory, internacionalmente conocido por desarrollar tanto sensores de microondas como de ondas milimétricas usados para estudiar la atmósfera y la superficie de la Tierra. Asimismo, el departamento cuenta con el Laboratory for Millimeter Wave Devices and Applications, donde se han construido receptores milimétricos para un observatorio del Polo Sur. Cuenta también con el Antenna and Propagation Laboratory.

Los métodos e instrumentos de la astronomía milimétrica tienen aplicaciones importantes en, prácticamente, todas las áreas de la astronomía moderna, lo que ha canalizado enormes sumas de dinero a la planeación y construcción de nueva infraestructura milimétrica como el GTM y el interferómetro ALMA, el último integrado como una colaboración entre Estados Unidos, Europa y Japón, cuyo costo se aproxima a los 1 000 millones de dólares. Formar estudiantes en los métodos de astronomía de alta frecuencia y la nueva tecnología asociada es, por lo tanto, crítico para el futuro de la ciencia. En Estados Unidos tal formación está en las manos de unas cuantas universidades que operan telescopios milimétricos o radiotelescopios, incluyendo a la University of Massachusetts Amherst. Es importante señalar que esta formación incluye no sólo investigación en ondas milimétricas, sino también el



FIGURA 8.2. Estudiantes de licenciatura y posgrado con el investigador Grant Wilson (derecha), en el Cryogenic Device Laboratory de la University of Massachusetts Amherst.

desarrollo de la siguiente generación de instrumentos. Además de observar con el telescopio de 14 m del FCRAO y otros telescopios milimétricos, muchos estudiantes de posgrado ya están trabajando en la nueva instrumentación del GTM, incluyendo los espectrómetros, la cámara SPEED y el buscador de corrimientos al rojo.

Como ha sido el caso del telescopio de 14 m, el GTM ha tenido gran influencia en los programas de licenciatura en física y astronomía. El FCRAO participa cada año en un programa de verano para estudiantes de licenciatura, que consiste en sesiones especiales de clase en temas de investigación, así como en la experiencia personal de trabajo con algún investigador. En general, la mitad de los estudiantes de verano participan en proyectos de investigación astronómica que pueden llegar a convertirse en una tesis. Es común que varias de esas tesis lleven a los estudiantes a iniciar sus estudios de posgrado en astronomía o disciplinas cercanas. Una vez que el GTM sea operado remotamente vía internet, las observaciones se volverán una herramienta de enseñanza para estudiantes, en aquellos cursos que en la actualidad usan el telescopio de 14 m del FCRAO.

El GTM brindará oportunidades para expandir la diversidad de género en astronomía y campos relacionados, incluyendo la ingeniería eléctrica y la computación. La University of Massachusetts Amherst tiene fuertes lazos con el Smith College y el Mount Holyoke College, que admiten únicamente mujeres. Durante los últimos años el personal del FCRAO ha ofrecido oportunidades de investigación a un número cada vez mayor de estudiantes de los colegios mencionados.

9. El Gran Telescopio Milimétrico y su relación con la sociedad

EL GRAN TELESCOPIO MILIMÉTRICO se encuentra en la cima del volcán Sierra Negra, conocido también como Tliltépetl, en el estado de Puebla. El sitio está ubicado dentro del Parque Nacional Pico de Orizaba, a $18^{\circ} 59' 06''$ de latitud norte, a $97^{\circ} 28' 53''$ de longitud oeste y a 4 580 m sobre el nivel del mar. Se encuentra a una distancia de aproximadamente 100 km de la costa del golfo de México y a unos 300 km de la costa del Océano Pacífico. Desde la ciudad de Puebla se puede llegar fácilmente después de recorrer 100 km por la autopista a Veracruz y 20 km por un camino de acceso.



FIGURA 9.1. Mapa de la región. El Tliltépetl se ubica a aproximadamente 100 km de la ciudad de Puebla y de la costa del golfo de México. [México: imagen espacial. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2002].



FIGURA 9.2. Vista aérea del volcán Sierra Negra o Tlitépetl, donde está emplazado el Gran Telescopio Milimétrico, a 4 580 m de altitud. Detrás se ve el Pico de Orizaba o Citlaltépetl, que a 5 747 m de altitud es el volcán más alto de México.

9.1 El Parque Nacional Pico de Orizaba

Sierra Negra está a sólo 7.3 km del Pico de Orizaba, el volcán más alto de México. El área adquirió el estatus de Parque Nacional en 1937 por decreto presidencial del general Lázaro Cárdenas,¹ del que citamos a continuación un extracto:

CONSIDERANDO que entre las montañas majestuosas que forman el relieve del territorio nacional, el Pico de Orizaba que es volcán y nevado, es a la vez uno de los más

portentosos y elevados del sistema volcánico del territorio nacional, que se admira cual majestuoso faro por los navegantes del golfo mexicano y en cuyos bosques se encuentran ejemplares de árboles de gran desarrollo, y especies arbóreas indígenas de la región, que es indispensable evitar que desaparezcan, ya que con ello se causaría un perjuicio irreparable al adelanto de las ciencias naturales de nuestro país; bosques que por otra parte convienen a los intereses de la Nación en general conservar, como una medida de protección local contra los efectos de la erosión, así como para mantener el buen clima de la región, asegurando el abastecimiento constante de aguas necesarias para la agricultura y la industria;

CONSIDERANDO que la misma belleza natural de esta montaña y la de su flora y fauna, forman un atractivo poderoso para el desarrollo del turismo, mejorando los senderos existentes para hacerla accesible por diversos puntos, los que constituirán una gran ventaja económica para los pueblos comarcanos; el Ejecutivo de mi cargo ha tenido a bien expedir el siguiente DECRETO [...] Se declara Parque Nacional el Pico de Orizaba, destinado a la conservación perpetua de la flora y fauna comarcanas.

El Parque Nacional Pico de Orizaba cubre un área de 19 750 ha en los estados de Puebla y Veracruz. Su vegetación se compone de zacatonales, bosque mixto de pino, abeto, ciprés, encino y bosque mesófilo de montaña. La fauna incluye venado cola blanca, mapache, conejo y zorra gris, entre otras especies. El clima es templado y frío. Desde la cara norte del Pico de Orizaba, o Citlaltépetl, se observa el glaciar Jamapa, con una extensión de 11 km aproximadamente. Varias ríos nacen en el Citlaltépetl, como el Papaloapan, el Jamapa y el Oriental, entre otros. Diversas corrientes internas y superficiales que se originan ahí bajan a ciudades cercanas.

Una de las peculiaridades del Parque Nacional Pico de Orizaba es la vegetación que se da a grandes alturas. Los bosques que se desarrollan a altitudes mayores de 3 200 m son de importancia primordial para la protección de la tierra y la estabilidad de la pendiente, porque ayudan a la preservación de la biodiversidad natural de plantas, animales, hongos y microorganismos que habitan en estos ecosistemas. Los bosques dominados por *Pinus hartwegii* y *P. rudis* son naturalmente raros, ya que sólo crecen en la región volcánica del centro de México y llegan a desarrollarse hasta 4 000 m de altitud. Algunos de los árboles más viejos tienen más de 300 años, lo que sugiere que el bosque jamás ha sido clareado para agricultura o pastoreo y que pertenece a la importante categoría de bosque primario. No obstante, la presencia de asentamientos irregulares aislados y los incendios han contribuido a



FIGURA 9.3. Regeneración natural, de entre 6 a 8 años atrás, de la especie nativa del Parque Nacional Pico de Orizaba *Pinus hartwegii*. En la parte trasera se identifica uno de los árboles padre o semillero.



FIGURA 9.4. El *Pinus hartwegii* llega a desarrollarse hasta a 4 000 m de altitud, como el que se muestra en la imagen. Detrás se ve el Citlaltépetl.

disminuir la capacidad del bosque para automantenerse. Entre los 3 200 y 3 600 m hay bosques de *Abies religiosa*. Los bosques de menor altitud, de 2 000 a 3 000 m, están dominados por *Pinus pseudostrobus*, *Abies religiosa* y *A. hikeli* en áreas más protegidas y fértiles, pero también hay otras especies menos comunes.²

La ubicación del GTM dentro de un parque nacional obliga a que el proyecto satisfaga la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, así como otras leyes. El proyecto llevó a cabo los estudios de impacto ambiental requeridos para la aprobación de la construcción del camino de acceso del telescopio y demás infraestructura de apoyo, como es la línea eléctrica. Una de las condiciones del permiso para construir el telescopio en el área cedida al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica fue que el instituto llevara a cabo la restauración ambiental del bosque en el área donde se construyó el camino de acceso a la cima. Específicamente se requirió reforestar con especies nativas 100 ha en el Tlitépetl. El proceso de reforestación motivó la interacción y cooperación con la gente del pueblo de Texmalaquilla, ya que se crearon empleos temporales para la gente de la localidad, con el apoyo de las autoridades estatales.

En México existen muchas áreas protegidas sujetas a programas especiales, llamados Programas de Conservación y Manejo,

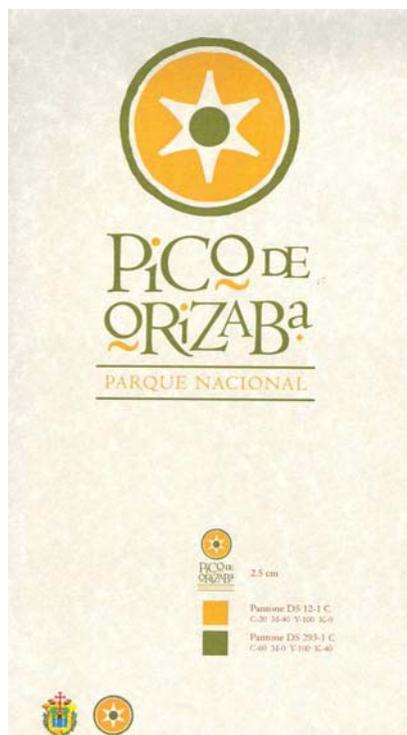


FIGURA 9.5. Logotipo del Parque Nacional Pico de Orizaba.



FIGURA 9.6. Campaña de reforestación del GTM en el Parque Nacional, en la que colaboraron pobladores de las comunidades aledañas.



FIGURA 9.7. Vista aérea del camino de acceso al GMT.

que definen las actividades permitidas, como la explotación forestal, la educación ambiental y las actividades de investigación, entre otras. Los programas de manejo establecen las normas y la subdivisión geográfica para estas actividades con el propósito de garantizar la conservación ambiental del área. El Parque Nacional Pico de Orizaba todavía no está dentro de ningún programa especial de protección.

El proyecto GMT ha estado colaborando estrechamente con las autoridades ambientales y, en un esfuerzo conjunto, ha sido la fuerza motriz para el desarrollo del Programa de Conservación y Manejo, que debe incluir la reforestación, la restauración y la conservación de las especies nativas del lugar, así como el establecimiento

de los criterios de regulación, operación y manejo dentro del parque. Por ejemplo, uno de los objetivos es desarrollar un manejo sustentable del bosque en las tierras ejidales. Otra meta es salvaguardar las extraordinarias condiciones de observación en el volcán Sierra Negra. Para garantizar el éxito de un programa tan ambicioso es fundamental la participación de comunidades aledañas, dependencias gubernamentales, organizaciones no gubernamentales y empresas, tanto en Puebla como en Veracruz.



FIGURA 9.8. Condiciones de observación privilegiadas. La imagen fue tomada desde la cima del volcán Sierra Negra. Las nubes se forman abajo de la cima dejando el cielo despejado para llevar a cabo las observaciones astronómicas.

De forma independiente se está trabajando en la protección de las frecuencias de operación del GTM, de 70 a 350 GHz, siguiendo las recomendaciones de la Unión Astronómica Internacional³ vía la Unión Internacional de Telecomunicaciones, con sede en Génova, Italia, y la Comisión Federal de Telecomunicaciones de México.

Algunos científicos de la University of Massachusetts Amherst, que pertenecen al Holdsworth Natural Resources Conservation Center y al Anthropology Department han colaborado con científicos de instituciones mexicanas, como el Colegio de Posgraduados de Chapingo, en cuestiones forestales, para asesorar al proyecto GTM con el propósito de alcanzar las metas ambientales. Se propone trabajar dentro del marco de un proyecto de desarrollo y conservación integral,² que garantice una sólida investigación ecológica y antropológica bien documentada. La idea es generalizar los resultados y desarrollar el proyecto como un modelo que incorpore las preocupaciones sociales, económicas y ambientales del área en futuros proyectos de tecnología avanzada.

Muchos programas de conservación tienen su origen en cuestiones relacionadas con un aspecto particular de conservación, como puede ser alguna especie animal en peligro de extinción o un área natural única. No obstante, en el caso del GTM la preocupación por la rehabilitación del parque nacional es una consecuencia directa de los planes de construcción y operación del telescopio. En la actualidad, el parque es una fuente de recreación y conservación ambiental subexplotada. Estando tan cerca de la capital del país y de otros centros urbanos importantes, representa un lugar excepcional, con un gran potencial. El compromiso del GTM de participar activamente en la elaboración y ejecución del Programa de Manejo para la Conservación ofrece una oportunidad importante de interactuar con y servir a las necesidades de un espectro de la población muy amplio.

9.2 El GTM y las comunidades aledañas

La localidad más cercana al telescopio es Texmalaquilla, una pequeña comunidad de alrededor de 1300 habitantes.⁴ Está a 5.3 km del sitio del GTM, a una altitud de 3 100 m. Cuenta con muy pocos servicios. El proyecto ha proporcionado apoyo legal en problemas de tenencia de tierras, por medio de la agilización de trámites ante dependencias del gobierno estatal o federal. Por ejemplo, ha sido el enlace entre la comunidad de Texmalaquilla y la Secretaría de Desarrollo Social en la organización de pláticas informativas de programas de apoyo a comunidades rurales.

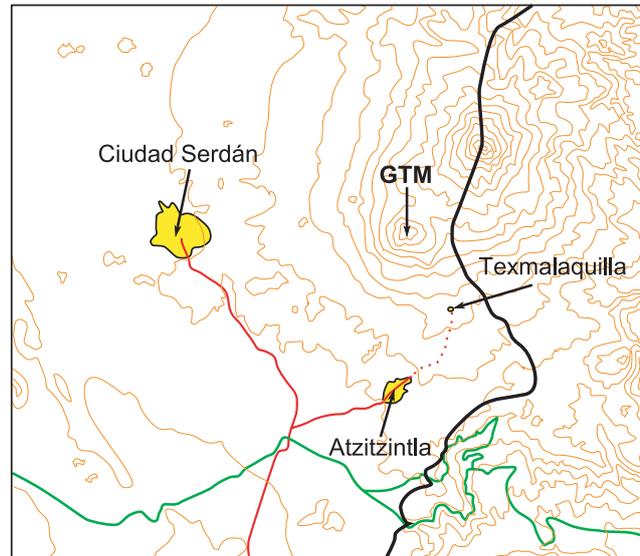


FIGURA 9.9. Mapa de la región más cercana al GTM. Texmalaquilla está a 5.3 km de la cima, Atzitzintla a 9 km y Ciudad Serdán a 14 km.

Se han desarrollado distintas actividades relacionadas con la educación. Con el apoyo del JPL, la doctora Clarice Lolich ha impartido cursos de verano sobre el Sistema Solar y el uso de telescopios a alumnos de primaria. En el tema de la educación para adultos, el proyecto GTM ha gestionado diversas actividades entre las que se encuentra una campaña de alfabetización, en el marco de las campañas anuales que organiza la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Por otro lado, se tiene programado llevar a cabo campañas de reforestación de forma periódica, en un esquema similar al de la primera realizada.



FIGURA 9.10. Niños de Texmalaquilla que tomaron el curso sobre el Sistema Solar impartido por la doctora Clarice Lolich.

Atzitzintla, que es cabecera municipal, es un poco más grande que Texmalaquilla, con una población de casi 3 000 habitantes.⁴ Está localizada a aproximadamente 9 km del telescopio, a una altitud de 2 680 m.

El proyecto GTM ha brindado apoyo a la comunidad funcionando como enlace entre las autoridades locales, estatales y federales. Otra aportación del proyecto ha sido el préstamo de maquinaria para realizar pequeños trabajos, como la limpieza de caminos de acceso o la compactación de caminos dañados por fuertes lluvias. Por otro lado, se han creado nuevas fuentes de empleo e ingresos extra por medio de la renta de casas y algunos otros servicios requeridos por empleados y contratistas del proyecto, así como por el personal que colabora en el proyecto y que visita el sitio.

Ciudad Serdán, también conocida como Chalchicomula de Sesma, con una población de casi 34 000 habitantes,⁴ está ubicada a cerca de 14 km del telescopio, a una altitud de 2 540 m. Es la cabecera distrital y localmente es la población con más servicios. Las autoridades están conscientes de la importancia del proyecto GTM. Se han organizado pláticas públicas para los empleados del gobierno local y estudiantes, con el propósito específico de explicar qué es el telescopio, cuáles son sus propósitos y aportaciones. El proyecto ha participado en las ferias anuales de la ciudad presentando exposiciones sobre el telescopio, que han atraído la atención de miles de visitantes. Las exposiciones han consistido en imágenes de la construcción del telescopio, carteles, videos, animaciones científicas y una maqueta del telescopio. Ha habido secciones dedicadas exclusivamente a los niños en las que se han incluido rompecabezas imantados, transbordadores de la NASA para armar y experimentos de física, entre otras actividades. El interés y la aceptación de la población ha sido extraordinario. La percepción general es que el GTM resultará en un beneficio cultural y educativo para sus comunidades.

9.3 El GTM y el público amplio

El proyecto GTM ha dado una gran importancia a sus actividades de divulgación, tanto en México como en Estados Unidos. Ha producido mucho material impreso como trípticos, folletos y carteles, que se han distribuido en diversas ferias y actividades de divulgación. Se han impartido numerosas pláticas públicas sobre el proyecto. También se han escrito artículos en periódicos y revistas de circulación



FIGURA 9.11. Las exposiciones sobre el GTM en la ferias de Ciudad Serdán han sido visitadas por miles de personas.



FIGURA 9.12. Niños en el proceso de recortar el transbordador espacial Atlantis de la NASA y armar un rompecabezas de los planetas, durante una de las ferias de Ciudad Serdán.

nacional y regional. El proyecto además cuenta con una página web muy completa <www.lmtgtm.org>.

Tanto los astrónomos del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica como los de la University of Massachusetts Amherst han sido entrevistados por diferentes medios en los ámbitos regional, nacional e internacional. Ha habido notas

y entrevistas en prácticamente todos los periódicos de circulación nacional de México y en periódicos importantes de Estados Unidos como el *Washington Post*, *Boston Globe* y *Los Angeles Times*. Agencias internacionales de noticias como Reuters y la agencia alemana de prensa Deutsche Presse-Agentur han escrito reportajes sobre el telescopio que se han publicado en una variedad de países de América y Europa. También revistas como *National Geographic* y *Cambio*, en sus respectivas ediciones latinoamericanas, han publicado artículos sobre el GTM. El proyecto ha estado presente en los canales de televisión locales y nacionales más importantes de México, como Canal 11, Televisa y TV Azteca. Ha tenido también una presencia importante en las cadenas de televisión hispana de Estados Unidos Univisión y Telemundo.

A largo plazo se planea tener una oficina de noticias del proyecto. Asimismo, el proyecto GTM tiene planeado montar un pequeño museo o centro de información en alguna de las localidades más cercanas a la cima del Tliltépetl, similar a los centros de información que han tenido tanto éxito en telescopios como el de Arecibo, en Puerto Rico, o los de Green Bank en Estados Unidos. El propósito es enseñar al público cuál es la función científica del telescopio, cuáles son los problemas que se quieren abordar, la importancia del proyecto tanto en México como en Estados Unidos y en el ámbito internacional, los retos implícitos en el diseño y la construcción, así como los resultados científicos esperados.

Anticipamos que habrá exposiciones y actos especiales. Una vez que el telescopio esté en operación se divulgarán los descubrimientos que se hagan. Se organizarán visitas al centro de información, donde se planea desarrollar programas educativos que comprendan a una comunidad más amplia. En estas actividades, el proyecto GTM se beneficiará de la rica experiencia que tanto el Instituto Nacional de



FIGURA 9.13. Niños de una escuela primaria durante una visita al INAOE, donde aprenden a observar el Sol.



FIGURA 9.14. Un grupo de primaria durante una visita al círculo solar en la University of Massachusetts para aprender cómo es el movimiento aparente del Sol a lo largo del año y el cambio de estaciones.

Astrofísica, Óptica y Electrónica como la University of Massachusetts Amherst han acumulado a lo largo de los años en las actividades de divulgación en sus observatorios y campus. El proyecto GTM procurará también establecer colaboraciones con otras universidades, para contribuir al éxito de tales actividades.

Referencias

- [1] Diario Oficial de la Federación. Lunes 4 de enero de 1937, Decreto que declara Parque Nacional el “Pico de Orizaba”.
- [2] Kelty, M.J., Hernández de la Rosa, P. y Nava, J. 2002, “Proposal for an Integrated Conservation and Development Project Related to GTM/LMT project, Cerro La Negra and Texmalaquilla”.
- [3] McNally, D. ed. 1994, “Report and Recommendations of the IAU Commission 50 (Identification and Protection of Existing and Potential Observatory Sites)”, en “The Vanishing Universe: Adverse Environmental Impacts on Astronomy”, Cambridge University Press.
- [4] Información extraída de la página del INEGI: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática <www.inegi.gob.mx>.

10. El Observatorio del Gran Telescopio Milimétrico

10.1 Introducción

EL OBSERVATORIO del Gran Telescopio Milimétrico operará el telescopio. Se trata de una nueva asociación civil formada conjuntamente por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica y la University of Massachusetts Amherst. Será el encargado de la conclusión, la instalación, el mantenimiento y la operación del telescopio. Estará gobernado por un consejo que tendrá entre sus funciones la designación del director y la aprobación tanto del presupuesto como del plan de operación anual. Por su parte, el director o directora, además de sus deberes de planeación, presupuesto y operación, será responsable de contratar al personal del observatorio. Se contempla la contratación de un ingeniero del telescopio, un gerente del sitio, personal administrativo, técnicos de mantenimiento, un grupo de científicos, así como personal dedicado a la divulgación del proyecto. En el año 2004, Alfonso Serrano, investigador del instituto, fue nombrado director interino del observatorio.

El consejo del Observatorio del Gran Telescopio Milimétrico estará asesorado por un comité científico y técnico externo formado por investigadores destacados provenientes de instituciones mexicanas y de otras partes del mundo. Los miembros del comité deberán tener amplia experiencia en la ciencia y la tecnología que se desarrollará con el telescopio. Asimismo, su trayectoria deberá estar relacionada con grandes proyectos científicos y de tecnología avanzada, como es el caso del GTM. De manera similar a como ha funcionado durante las etapas de diseño y construcción del telescopio, el comité científico y técnico se reunirá anualmente con el propósito de darle un seguimiento cercano al proyecto.

TABLA 10.1. Miembros del comité asesor científico y técnico del Gran Telescopio Milimétrico en 2004.

| <i>Miembro</i> | <i>Institución</i> |
|----------------------------|---|
| Paul Goldsmith, Presidente | University of Cornell, Estados Unidos |
| Roger Hildebrand | University of Chicago, Estados Unidos |
| Richard Hills | University of Cambridge, Inglaterra |
| Javier Jiménez Espriú | Grupo Nec de México, S.A. de C.V. |
| Richard Kurz | Observatorio Europeo Austral |
| Arcadio Poveda | Instituto de Astronomía, UNAM, México |
| Luis Felipe Rodríguez | Centro de Radioastronomía y Astrofísica, UNAM, México |
| Nick Scoville | California Institute of Technology, Estados Unidos |
| Gianni Tofani | Istituto di Radioastronomia, Bolonia, Italia |

En cuanto a los aspectos científicos, el director se asesorará por un grupo de astrónomos e ingenieros del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica y de la University of Massachusetts Amherst. Dicho grupo planificará los programas científicos, las actualizaciones y mejoras al telescopio, así como el desarrollo de nuevos instrumentos. Dichos instrumentos serán responsabilidad de las dos instituciones y no del observatorio. También se promoverá tener instrumentos de otras instituciones, previo convenio de colaboración.

10.2 Infraestructura

El observatorio contará con la infraestructura necesaria para operar el telescopio, como es la sala de control, algunos talleres para llevar a cabo el mantenimiento y los servicios básicos. No obstante, debido a la altitud del sitio, se planea que los observadores y el personal técnico no duerman en la cima. En particular, una vez que el telescopio esté en operación, la mayoría de los observadores permanecerán en sitios a menor altitud, ya sea en el centro de operaciones del telescopio o, a largo plazo, en sus instituciones, observando vía internet.



FIGURA 10.1. Miembros del comité asesor científico y tecnológico y de los grupos de trabajo del Gran Telescopio Milimétrico durante su visita al sitio, en enero de 2002. Se aprecia el cono de concreto del telescopio. En el fondo se ve el Pico de Orizaba.

El observatorio tiene programado desarrollar un centro de operaciones al pie del Tlitépetl, con una conexión de banda ancha al telescopio. Asimismo, incluirá un centro de computación, talleres de electrónica y mecánica, habitaciones, cocina, almacenes para equipo y suministro, así como una estación de primeros auxilios.

Las oficinas principales estarán en el campus del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en Tonantzintla, muy cerca de la ciudad de Puebla, donde se encontrarán las consolas de observación y las computadoras requeridas para llevar a cabo las observaciones remotamente. El campus del instituto ofrece la ventaja de



FIGURA 10.2. Cholula es una ciudad que ha estado poblada ininterrumpidamente por más de 2 000 años. Al fondo se aprecian los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl.

contar con infraestructura para visitantes como son oficinas, habitaciones y comedor, entre otras. Alternativamente, es posible hospedarse en Cholula, muy cerca de Tonantzintla, o en la ciudad de Puebla.

En Estados Unidos se establecerá un centro de observación en la University of Massachusetts, una vez que la observación remota funcione. Se considera que será el sitio más conveniente para observadores que trabajen en el país, y una alternativa para los observadores que no provengan de Estados Unidos o México.

10.3 Operación

El observatorio tiene elaborado un plan de operación incremental. Después de las pruebas iniciales de operación de los diferentes sistemas, que deben funcionar de forma coordinada y confiable, será posible llevar a cabo las primeras observaciones científicas siguiendo un programa diseñado especialmente para tal efecto. En esta etapa los astrónomos estarán en el sitio durante las observaciones y controlarán tanto la antena como los programas de adquisición de datos vía el sistema de control y seguimiento, o bien trabajarán directamente con los operadores del telescopio. En la siguiente etapa, el control del telescopio se llevará a cabo remotamente desde el centro de operaciones ubicado al pie de la montaña y se trabajará de forma coordinada con el personal de apoyo que estará en el sitio.

Cuando todos los sistemas asociados al GTM funcionen de manera confiable y la comunicación sea estable, los astrónomos llevarán a cabo sus observaciones desde Tonantzintla o desde Amherst.

El plan de operación inicial no excluye la posibilidad de llevar a cabo observaciones en modo de servicio, como puede ser la observación de algunas fuentes de oportunidad. Conforme avance la operación del telescopio, se irán desarrollando herramientas para observaciones con calendarización flexible, que es la meta final, ya que esto maximiza la productividad científica.

10.4 Oportunidades de participación para la comunidad astronómica

El tiempo de observación en el nuevo telescopio será asignado entre el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica y la University of Massachusetts de acuerdo con su contribución a la construcción de la antena y su instrumentación. Se espera que la distribución de tiempo sea aproximadamente igual entre los dos socios. Cada uno determinará los mecanismos de asignación de tiempo de telescopio a su comunidad, con el propósito común de optimizar la productividad científica y educativa del GTM. Durante los primeros años se espera que una fracción del tiempo total se dedique a colaboraciones entre las dos instituciones para llevar a cabo proyectos de gran trascendencia científica, conocidos como proyectos clave.

En el caso de México se contempla que el tiempo de observación sea otorgado por un comité de asignación de tiempo de telescopio formado por astrónomos

destacados. Dicho comité evaluará las propuestas de acuerdo con los méritos científicos, la viabilidad del proyecto con el GTM y la aportación a la formación de estudiantes, entre otros criterios. El tiempo de observación estará abierto a la comunidad astronómica nacional. Se prevé que los astrónomos de otros países que deseen usar el telescopio lo harán vía colaboraciones con astrónomos que trabajen en México.

En el caso de la University of Massachusetts Amherst, el tiempo de observación estará distribuido de manera similar a como se asigna el tiempo en el FCRAO, el radio observatorio actual de la universidad. El FCRAO tiene también un comité de asignación de tiempo de telescopio que acepta propuestas de astrónomos de cualquier parte del mundo. La experiencia ha mostrado que aproximadamente la mitad del tiempo se destina a astrónomos de otras universidades.

Tanto el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica como la University of Massachusetts Amherst están abiertos al uso del GTM por colaboradores de otras partes del mundo. Se espera recibir propuestas que incluyan tanto el uso de los instrumentos existentes, como el de posibles instrumentos visitantes que complementen a los inicialmente planeados para el GTM.

Glosario

AAO: Anglo Australian Observatory

2MASS: Two Micron All Sky Survey. Censo del cielo en el infrarrojo cercano llevado a cabo por la University of Massachusetts Amherst.

ACBAR: Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver. Cámara bolométrica, producida mediante una colaboración entre la University of California-Berkeley y la University of Case Western Reserve, Cleveland, con el propósito de realizar observaciones cosmológicas del fondo de radiación de microondas a escalas de minutos de arco.

ACT: Atacama Cosmology Telescope. Telescopio de 6 m de diámetro que se proyecta instalar en el desierto de Atacama, Chile, para realizar estudios cosmológicos, fruto de una colaboración entre instituciones e investigadores de Estados Unidos, Canadá, México, Sudáfrica, el Reino Unido y Chile.

AES/EBU: American Engineering Society/European Broadcasting Union. Interfaz serial estándar para transferir audio digital entre dispositivos tales como CD, DVD y amplificadores.

ALMA: Atacama Large Millimeter Array. Conjunto de 64 antenas submilimétricas de 12 m de diámetro, que se encuentra en construcción en el desierto de Atacama. El interferómetro está administrado por un consorcio entre Estados Unidos, varios países europeos y Japón.

APEX: Atacama Pathfinder Experiment. Telescopio submilimétrico de 12 m instalado en el desierto de Atacama, resultado de una colaboración entre institutos de

investigación y universidades de Alemania, Suecia y el Observatorio Europeo Austral. Su objetivo principal es construir grandes catálogos de fuentes que pueden ser exploradas subsecuentemente con el ALMA.

ARO: Arizona Radio Observatory. Comprende dos radiotelescopios administrados por la University of Arizona: el telescopio milimétrico de 12 m de Kitt Peak y el telescopio submilimétrico de 10 m de Mount Graham, ambos en Arizona.

ASTRO-F: Telescopio infrarrojo japonés de 68.5 cm que se lanzará en un satélite a principios de 2006. Su misión es trazar un mapa de todo el cielo en el infrarrojo lejano, además de llevar a cabo programas científicos destinados a observaciones puntuales de objetos de interés.

autocorrelador: circuito digital que muestrea la forma de la onda de la señal de entrada a una velocidad muy alta y construye el espectro mediante un procesamiento digital.

AZTEC: Astronomical Thermal Emission Camera. Cámara bolométrica de 144 píxeles que será uno de los instrumentos iniciales del GTM y que en la actualidad está funcionando en el telescopio de 15 m JCMT sito en Hawai.

BATSE: Burst Alert and Transient Source Experiment. Instrumento que operó en el observatorio de rayos gamma CGRO de la NASA de 1991 a 2000, con el propósito principal de estudiar los destellos de rayos gamma.

BEPOSAX: observatorio italiano de rayos X a bordo de un satélite, con participación de la agencia espacial holandesa, que operó entre 1996 y 2002. Su intervalo espectral de operación fue de 0.1 a 200 keV.

BLAST: Balloon-borne Large Aperture Sub-millimeter Telescope. Telescopio submilimétrico de 2 m de diámetro que opera a bordo de un globo (2004-). El proyecto es fruto de una colaboración entre institutos de Estados Unidos, Canadá, Reino Unido y México.

bolómetro: detector de radiación térmica. Un modelo simple lo describe como un absorbedor con una capacidad calorífica dada, conectado a un baño térmico a temperatura T , por una conductancia G . La temperatura del absorbedor cambia en respuesta a cambios en la potencia incidente y estas fluctuaciones en la temperatura se miden con termómetros muy sensibles. La sensibilidad de los

bolómetros mejora reduciendo su temperatura base y aumentando la sensibilidad de los termómetros.

C++: lenguaje de computación.

Caltech: California Institute of Technology.

CARMA: Combined Array for Research in Millimeter-wave Astronomy. Interferómetro milimétrico de 6 antenas de 10.4 m y 10 antenas de 6.1 m de diámetro, instalado en California y administrado por el Caltech y la University of California-Berkeley.

CBI: Cosmic Background Imager. Radiotelescopio que opera de 26 a 36 GHz, ubicado en los andes chilenos para realizar imágenes del fondo de radiación cósmica. Lo administra una asociación de institutos de Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, Alemania y Chile.

centauros: cuerpos rocosos y helados cuyos tamaños varían de unos cuantos a varios kilómetros. Orbitan alrededor del Sol en la región de los planetas gigantes.

CfA: Center for Astrophysics. Instituto de investigación administrado conjuntamente por la Harvard University y el Smithsonian Astrophysical Observatory.

CGRO: Compton Gamma-Ray Observatory. Observatorio de rayos gamma a bordo de un satélite. Es uno de los cuatro grandes observatorios de la NASA.

CMBPOL: Cosmic Microwave Background Polarization. Proyecto de la NASA para medir la polarización del fondo de radiación cósmica.

CO: Monóxido de carbono. Es el trazador más abundante de los constituyentes del gas en las nubes moleculares densas.

COBE: Cosmic Background Explorer. Experimento de la NASA para medir el fondo difuso de radiación cósmica infrarroja y de microondas (1989-1993). Realizó grandes descubrimientos, entre otros la existencia de un fondo infrarrojo, obtuvo con gran precisión la medida de la temperatura del fondo de radiación cósmica de microondas y la detección de fluctuaciones en este fondo.

coma: atmósfera de un cometa formada por gas sublimado del núcleo, conforme el núcleo es calentado por el Sol.

- Conacyt: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México.
- CORBA: Common Object Request Broker Architecture. Arquitectura e infraestructuras asociadas que las computadoras usan para trabajar en red.
- CRYA: Centro de Radioastronomía y Astrofísica de la UNAM, ubicado en Morelia, Michoacán.
- CSO: Caltech Sub-millimeter Observatory. Observatorio submilimétrico del Caltech, compuesto por un telescopio de 10 m, ubicado en Hawai.
- Chandra (Observatorio): satélite observatorio de rayos X. Es uno de los cuatro grandes observatorios de la NASA (1999-).
- CXC: Chandra X-Ray Center, Cambridge, Massachusetts.
- dB: decibelio. Escala logarítmica que mide la relación entre dos potencias acústicas o electrónicas.
- ESA: European Space Agency. Agencia Espacial Europea.
- EVLA: Expanded Very Large Array. Proyecto para aumentar la sensibilidad del VLA en un orden de magnitud.
- FCRAO: Five College Radio Astronomy Observatory, operado por la University of Massachusetts Amherst.
- FI: frecuencia intermedia
- FI (amplificador de): amplificador que se acopla al mezclador y aumenta aún más la potencia de la señal. Son mucho más baratos que los de radiofrecuencias y proveen la mayoría de las ganancias usadas en un receptor.
- filtro: dispositivo que selecciona una banda de frecuencia angosta dentro del circuito de frecuencia intermedia y desecha todas las demás frecuencias. Se puede usar un gran número de ellos para producir un espectro.
- GBT: Green Bank Telescope. Radiotelescopio de 100 m en Green Bank, ubicado en el oeste de Virginia, administrado por el NRAO.

GLAST: Gamma-ray Large Area Space Telescope. Telescopio de gran área diseñado para detectar rayos gamma, de 10 MeV a más de 100 GeV, en un campo de visión de 2.5 estereorradianes, resultado de una colaboración entre Estados Unidos, Francia, Italia, Japón y Suecia, que será lanzado en un satélite en 2007.

Goddard Space Flight Center: centro de la NASA en Greenbelt, Maryland.

Gran Telescopio Canarias: telescopio óptico de 10.4 m, que se encuentra en construcción en el Roque de los Muchachos, en La Palma, Canarias, fruto de una colaboración entre España, México y la University of Florida.

GTM: Gran Telescopio Milimétrico. También denotado LMT, por sus siglas en inglés, Large Millimeter Telescope.

guías de onda: tubo metálico hueco en el cual la señal se propaga en un proceso de reflexión múltiple en las paredes. La onda se propaga en una distribución de energía particular llamada modo.

HII (región): región en torno de una estrella caliente dentro de la cual el hidrógeno del medio interestelar está ionizado por la radiación ultravioleta de la estrella.

hoyo negro supermasivo: se cree que pueblan los centros de las galaxias y que pueden tener una masa de millones o miles de millones de masas solares.

Herschel: telescopio a bordo de un satélite para observaciones infrarrojas y milimétricas. Proyecto de la ESA cuyo lanzamiento está programado para 2007.

IAS: Institute for Advanced Studies, Princeton.

IAUNAM: Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México. Tiene una sede en la Ciudad de México y otra en Ensenada, Baja California.

IDL: Interactive Data Language.

IFA-HAWAII. Institute for Astrophysics, University of Hawaii.

IIOP: Internet Inter Orb Protocol. Protocolo normativo para la informática distribuida en internet.

INAOE: Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica ubicado en Tonantzintla, Puebla, México. Contraparte mexicana del proyecto GTM.

InP: Fosfato de indio. Componente químico.

IR: infrarrojo.

IRAM: Institut de Radioastronomie Millimétrique. Colaboración entre Francia, Alemania y España que opera dos telescopios, la antena milimétrica de 30 m de Pico Veleta en España, y el interferómetro de 6 antenas de 15 m de Plateau de Bure, en Francia.

Java: lenguaje de computación.

JCMT: James Clerk Maxwell Telescope. Telescopio submilimétrico de 15 m ubicado en Hawai, fruto de una colaboración entre el Reino Unido, Holanda y Canadá.

JNI: Java Native Interface. La interfaz nativa de Java.

JPL: Jet Propulsion Laboratory, administrado por la NASA.

JWST: James Webb Space Telescope. Proyecto de telescopio espacial de 6 m de diámetro, que se planea como sucesor del telescopio espacial Hubble.

LMT: Large Millimeter Telescope. Siglas en inglés del Gran Telescopio Milimétrico.

materia oscura fría: la componente de material de origen desconocido que constituye casi 23% de la energía del Universo en los modelos aceptados en la actualidad. Otro 73% es energía oscura, que acelera la expansión del Universo, y el 4% restante está concentrada en bariones, que constituyen la mayor parte de la materia encerrada en los átomos y otras partículas detectadas en laboratorios.

magneto-hidrodinámico: proceso en el que deben considerarse los efectos magnéticos de un fluido.

MAMBO: Max-Planck Millimeter Bolometer. Ensamble de receptores de continuo en el telescopio de 30 m de IRAM.

medio interestelar: el gas, el polvo y la radiación entre las estrellas.

mezclador: circuito que combina una señal de entrada con la de un oscilador local y produce una señal de salida, llamada frecuencia intermedia, que es igual a la diferencia de frecuencias entre ellas.

multiplexación: combinación de dos o más señales independientes en recepción, el proceso inverso separa el flujo de datos en las dos o más señales originales.

multiplexación: combinación de dos o más señales independientes en una única señal compuesta para ser transmitida por un canal común. En el extremo de recepción, el proceso inverso separa el flujo de datos en las dos o más señales originales.

NASA: National Aeronautics and Space Administration. Administración de Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos.

nubes moleculares gigantes: concentraciones de polvo y gas interestelar donde se forman las estrellas.

NRAO: National Radio Astronomy Observatory. Radioobservatorio nacional de Estados Unidos que opera varios radiotelescopios en su territorio y en el continente americano.

NSF: National Science Foundation. Agencia federal que financia la investigación básica en Estados Unidos.

objetos cercanos a la Tierra: asteroides o cometas cuyas órbitas se acercan o cruzan la órbita de la Tierra.

objetos del Cinturón de Kuiper: cuerpos helados que se encuentran en las partes externas del Sistema Solar, más allá de la órbita de Neptuno.

Observatorio Interamericano Cerro Tololo: ubicado en Chile, cuenta con un conjunto de telescopios ópticos de varios tamaños.

oscilador local: señal monocromática de gran amplitud que se aplica a un mezclador junto con la señal de entrada. La oscilación grande del voltaje del oscilador local provoca que el mezclador se vuelva no lineal.

OMAR: One Millimeter Array Receiver. Ensamble de receptores heterodinos programado para el GTM.

Oort (nube de). Nube muy lejana, aproximadamente esférica, que orbita alrededor del Sol, postulada por el astrónomo holandés Jan Oort como la fuente de los cometas de periodo largo.

pc: parsec. Unidad de longitud, definida como distancia a la cual una estrella tiene un paralaje de un segundo de arco. Equivale a 3.26 años luz o a 3.09×10^{13} km, es decir, aproximadamente 30 billones de kilómetros.

pixel: elemento más pequeño de que se compone una imagen, por ejemplo la desplegada en la pantalla de una computadora.

potencia equivalente de ruido: cambio en la potencia incidente necesario para producir una señal detectable. Se expresa en unidades de $W/\sqrt{\text{Hz}}$.

Rama de las gigantes rojas: Estadio tardío en la evolución de una estrella.

receptor o detector coherente: receptor que acopla a un solo modo el campo de radiación incidente y que es capaz de medir simultáneamente la amplitud y la fase de este modo.

receptor heterodino: receptor coherente que usa un convertidor de frecuencias o mezclador para transformar la banda de frecuencias de entrada a una banda de frecuencia intermedia, de frecuencia mucho menor. A esta frecuencia más baja, el procesamiento de la señal es mucho más fácil. Casi todos los receptores coherentes son heterodinios.

receptor incoherente: receptor que produce una salida de corriente directa (o casi), que es proporcional a la potencia de entrada. Los elementos del detector no discriminan señales de acuerdo con su frecuencia y pueden acoplar muchos modos del campo incidente. La señal de salida no tiene relación con la frecuencia de la señal de entrada. Los bolómetros y los detectores fotoconductores son incoherentes.

RF: radiofrecuencia.

RF (amplificador de): dispositivo que aumenta la potencia de la señal de entrada de un receptor. La mayoría de los amplificadores de ondas milimétricas tienen entradas de guías de ondas, en particular a frecuencias mayores de 50 GHz.

ROE: Royal Observatory Edinburgh.

SCUBA: Sub-millimeter Common Use Bolometer Array. Instrumento que mide el continuo submilimétrico en los astros en el JCMT.

SDSS: Sloan Digital Sky Survey. Censo de aproximadamente una cuarta parte del cielo, en longitudes de onda visibles.

SEQUOIA: Second Quabbin Optical Imaging Array. Cámara de plano focal de 32 elementos para espectroscopía. Es uno de los instrumentos iniciales del GTM, actualmente en operación en el telescopio de 14 m del FCRAO.

SETI Institute: Search for Extraterrestrial Intelligence Institute. Proyectos de búsqueda de señales inteligentes de otras civilizaciones en nuestra galaxia. Generalmente se usan señales de radiofrecuencias.

SgrA*: Sagitario A*. Radiofuente compacta en el centro de la Vía Láctea. Se cree que es producida por un hoyo negro masivo.

SINGS: Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey. Censo infrarrojo de galaxias cercanas realizado con el telescopio espacial Spitzer.

SIS: superconducting-insulating-superconducting. Tipo de junta superconductor-aislante-superconductor utilizada en algunos receptores milimétricos.

SN: supernova.

SPEED: Spectral Energy Distribution Camera. Cámara para el GTM que usa bolómetros seleccionadores de frecuencia para medir simultáneamente la potencia en cuatro bandas.

Spitzer: telescopio espacial Spitzer, de 85 cm de diámetro, optimizado para observaciones en el infrarrojo, a bordo de un satélite. Es uno de los cuatro grandes observatorios de la NASA, antes conocido como SIRTf.

STSCI: Space Telescope Science Institute, Baltimore.

SWAS: Submillimeter-Wave Astronomy Satellite. Satélite de la NASA y de varias universidades estadounidenses para estudiar la emisión de agua y de otras moléculas (1995-).

Swift: observatorio de la NASA para observar destellos de rayos gamma y sus contrapartes en rayos X, ultravioleta y visible (2004-).

s-z (efecto): Efecto Sunyaev-Zel'dovich, producido por la interacción de los fotones del fondo de radiación cósmica de microondas con los electrones calientes del medio intergaláctico.

Telescopio Espacial Hubble: telescopio de 2.4 m de apertura, que opera entre el ultravioleta y el infrarrojo, fruto de una colaboración entre la NASA y la ESA. Es uno de los cuatro grandes observatorios de la NASA.

$T_{sistema}$: temperatura de sistema de un bolómetro: es la temperatura equivalente al sistema compuesto por el detector, sus componentes y el telescopio. Es igual a la potencia equivalente de ruido dividida por la respuesta óptica.

Temperatura equivalente de ruido de un bolómetro: se define en términos de la respuesta del sistema a una fuente con un espectro térmico, es decir, es igual a $T_{sistema}/\sqrt{\Delta\nu}$.

UA: unidad astronómica. Distancia promedio Tierra-Sol, aproximadamente igual a 150 millones de kilómetros.

University of Massachusetts Amherst. Contraparte estadounidense del proyecto GTM.

VLA: Very Large Array. Interferómetro de 27 antenas de 25 m de diámetro, dispuestas en forma de Y al oeste de Socorro, Nuevo México, operado por el NRAO.

VLBA: Very Long Baseline Array. Interferómetro de 10 radiotelescopios de 25 m de diámetro, distribuidos en el territorio estadounidense y operado por el NRAO.

VLBI: Very Long Baseline Interferometry. Interferometría de base muy larga que combina señales de dos o más radiotelescopios, separados por grandes distancias para alcanzar una mayor resolución angular.

VME: Versa Module Europa. Sistema de canal de datos flexible que usa el estándar Eurocard para tareas de computación intensivas. Consta de cuatro subcanales: transferencia de datos, arbitraje, prioridad de interrupciones y utilerías. La transferencia de datos es asíncrona, por lo que puede trabajar con tiempos de respuesta muy variados.

VxWorks: sistema operativo que funciona en tiempo real. Requiere una estación de trabajo anfitriona para desarrollar programas. A diferencia de otros sistemas como Unix, el desarrollo de VxWorks puede hacerse en una máquina anfitriona que corra Unix o Windows, vía compilación cruzada para correr en varias arquitecturas de CPU.

WFPC2: Wide Field/Planetary Camera 2, cámara para imagen óptica del Telescopio Espacial Hubble.

WMAP: Wilkinson Microwave Anisotropy Probe. Misión de la NASA (2001-) para cartografiar el fondo de radiación cósmica en toda la bóveda celeste.

XML: Extensible Markup Language. Lenguaje de computación usado para el sistema de control y monitoreo del GTM.

XMM: Newton observatory: satélite observatorio de rayos X operado por la ESA (2000-).

El Gran Telescopio Milimétrico:
Dos países vecinos exploran juntos el cosmos
se terminó de imprimir en junio de 2006
en los talleres de Offset Rebosán, S.A. de C.V.,
Acueducto 115, Huipulco Tlalpan, 14370 México, D.F.

Diseño de interiores y formación: *Axel Retif*,
en $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$, distribución \gn\TeX
(<http://ii2.sourceforge.net/tex-index.html>),
con tipos Lucida (<http://www.tug.org/lucida>)
de 10:15 puntos.

Preparación del material gráfico: *Jorge Reyes*.

La edición estuvo al cuidado de
Esperanza Carrasco y Antonio Bolívar.