



El Gran Telescopio Milimétrico

David H. Hughes e Itziar Aretxaga

Ubicado a 4 mil 580 metros de altitud, en el Parque Nacional Pico de Orizaba, este telescopio de 50 metros de diámetro es capaz de explorar el medio interestelar de las galaxias, regiones lejanas y fuertemente oscuras por polvo cósmico.

Cuando entre en operación, el Gran Telescopio Milimétrico será el más grande y poderoso de los telescopios milimétricos de apertura simple en el mundo. Explorará el universo para caracterizar los procesos que llevaron a la formación y evolución de los cúmulos de galaxias, las galaxias, las estrellas y los planetas de nuestro sistema solar y de otras estrellas cercanas. Esto permitirá realizar avances fundamentales en las áreas de la astronomía, la cosmología y las ciencias planetarias. La naturaleza interdisciplinaria de estas áreas del conocimiento implica que los nuevos descubrimientos que se realicen tendrán relevancia para otras áreas de la ciencia, como la física, la química, la geología y la biología terrestre.

El nuevo telescopio tiene 50 metros de diámetro, y está optimizado para detectar ondas milimétricas, entre 0.85 y 4 milímetros. Es el mayor proyecto científico realizado conjuntamente por México y Estados Unidos, y supone la mayor inversión en un proyecto científico en la historia de México. El proyecto lo encabezan dos institutos de investigación astronómica de excelencia en sus respectivos países: el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), uno de los centros del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), en México, y la Universidad de Massachusetts en Amherst (UMass-Amherst), en Estados Unidos.

Como proyecto binacional financiado principalmente con fondos públicos, las comunidades científicas de México y Estados Unidos tendrán acceso a sus pres-

taciones a través de concursos fallados por un comité de asignación de tiempo, que estará integrado por astrónomos destacados. El concurso, como es habitual en este tipo de telescopios, atenderá al potencial impacto científico de los proyectos concursantes, su viabilidad, la competencia del equipo científico, y su aportación a la formación de recursos humanos, entre otros criterios.

Selección del sitio

El telescopio se encuentra dentro del Parque Nacional Pico de Orizaba, en la cima del volcán extinto Tliltépetl (o Sierra Negra), de 4 mil 580 metros de altitud, a casi 100 kilómetros de la ciudad de Puebla, y aproximadamente a la misma distancia del Golfo de México. El Tliltépetl fue selecciona-

do entre una lista de picos elevados de México por el bajo contenido de vapor de agua de su cielo y la pendiente relativamente suave de su orografía, que ha permitido construir una carretera de acceso a la cima.

El vapor de agua de la atmósfera absorbe muy eficientemente las delicadas ondas de radio milimétricas; de ahí que los observatorios milimétricos (por ejemplo, el Mauna Kea, en las islas Hawai, a 4 mil 100 metros, o el de Pampa la Bola y los bajos de Chajnantor, en el desierto de Atacama, Chile, a 5 mil metros) se ubiquen en lugares secos y elevados, para detectarlas antes de que sean absorbidas. Las medidas de la transparencia al radio del Tliltépetl arrojan una mediana de 2 milímetros de vapor de agua precipitable durante aproximadamente nueve meses al año. Las condiciones son óptimas para operar el telescopio en las longitudes de onda más cortas (de 0.85 a 1 milímetros) durante los meses de otoño-invierno-primavera, la temporada seca del altiplano mexicano, mientras que el resto del tiempo se podrán realizar observaciones en las longitudes de onda más largas (de 1 a 4 milímetros).



El Gran Telescopio Milimétrico, en la cima del Volcán Tliltépetl (estado de Puebla), con el Citlaltépetl (Pico de Orizaba) a la derecha.
Fotografía: Jorge Reyes, INAOE.

Las condiciones meteorológicas son moderadas para un sitio de alta montaña: las nevadas son ligeras, el ciclo de temperaturas diurnas es de aproximadamente 2 grados centígrados, y la temperatura media varía entre estaciones en sólo unos 5 grados centígrados. El factor más crítico para la antena es la velocidad del viento, ya que éste puede distorsionar la forma del reflector primario y afectar la puntería con que se enfocan y siguen los astros. La mediana de la distribución de la velocidad del viento es 4.0 metros por segundo, mientras que el telescopio ha sido diseñado con el propósito de que se apegue a las especificaciones técnicas para realizar observaciones a menos de 10 metros por segundo, lo que ocurre 90 por ciento del tiempo.

Desarrollo del proyecto

El telescopio fue inaugurado en noviembre de 2006 por el presidente de la República, licenciado Vicente Fox. El proyecto había completado en esos momentos la integración de la ingeniería mecánica, el sistema de movimiento autónomo

y la superficie reflectora primaria del telescopio. La celebración de inauguración incluyó observaciones del Gran Telescopio Milimétrico a 12 gigahertz (2.5 centímetros) de la galaxia Virgo A, lo que se considera la primera luz técnica del telescopio (Figura 1).

Durante el 2007 el proyecto desmontó y volvió a montar la superficie reflectora primaria, para alinearla bajo las especificaciones necesarias con el fin de realizar observaciones en ondas milimétricas, y ha comenzado la verificación de los componentes de ingeniería mecánica y óptica. Tan pronto se verifique que la superficie primaria tiene una precisión (desviación cuadrática media) por debajo de los 150 micrómetros, se podrán empezar a realizar verificaciones científicas a 3 milímetros, e inmediatamente después las primeras observaciones científicas de interés. Se estima que estas



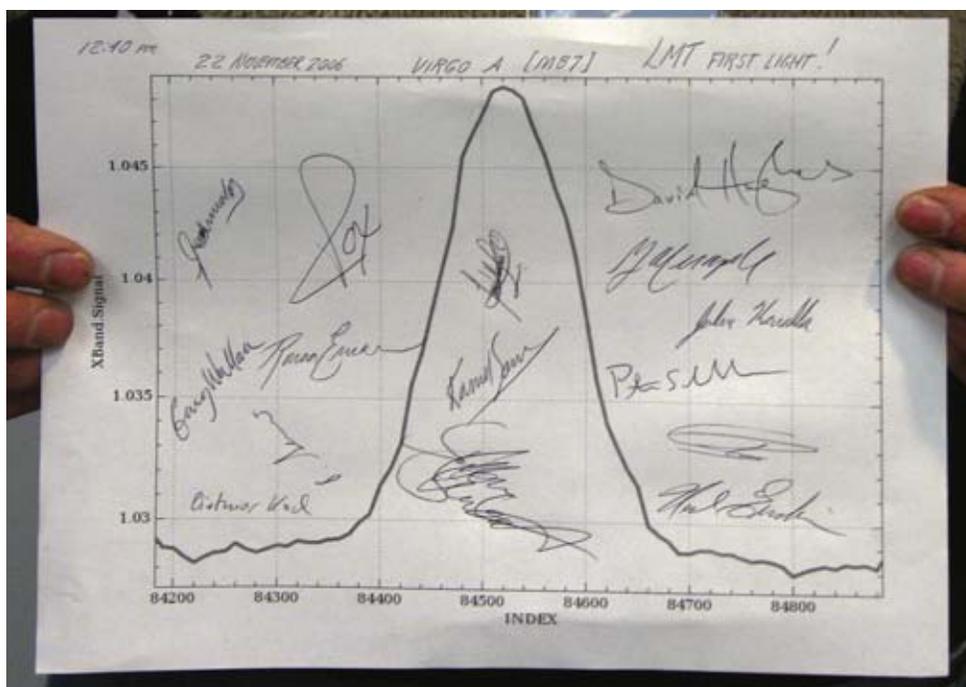


Figura 1. Recepción a 12 gigahertz de Virgo A (M87) durante la inauguración del Gran Telescopio Milimétrico, en noviembre 2006. La gráfica muestra el cambio de la densidad de flujo recibido cuando el telescopio efectuó un barrido del cielo que pasaba sobre la galaxia, y está firmado por el equipo de verificación del Gran Telescopio Milimétrico y por el presidente Vicente Fox, quienes conjuntamente realizaron la observación.

observaciones de verificación científica a 3 milímetros con una superficie reflectora de 30 metros se podrán realizar de finales del 2008 a principios del 2009. Se debe lograr una precisión de la superficie de menos de 75 micrómetros para poder realizar observaciones a 1 milímetros con la eficiencia planeada en el diseño de la antena. La etapa de verificación óptica sólo se completará totalmente una vez se llegue a esta precisión para una superficie reflectora primaria de 50 metros.

Relación con otros telescopios milimétricos

Las resoluciones del Gran Telescopio Milimétrico, de 4.2 a 14.8 segundos de arco de 0.85 a 3 milímetros (lo que supone que podría ver la extensión de una moneda de un peso a 10 kilómetros de distancia), son de tres a cinco veces mejores que las ofre-

cidas a las mismas frecuencias por otros telescopios de apertura simple que operan en la actualidad.

Esto es suficiente para resolver completamente el fondo de radiación extragaláctico, que ha sido creado por la emisión integrada de los astros a lo largo de toda la historia del universo. En contraste, las imágenes más profundas realizadas por telescopios milimétricos más pequeños son confusas, y mezclan la emisión de galaxias más débiles en un fondo, y sólo pueden aislar del 20 al 50 por ciento de la emisión extragaláctica en fuentes individuales. Estas fuentes resueltas, además, no son típicas, sino que se cree representan los sistemas galácticos más masivos que el universo ha sido capaz de formar. Puesto que menos del 0.01 por ciento del cielo ha sido cartografiado y resuelto en ondas milimétricas, el Gran Telescopio Milimétrico tendrá que hacer censos de grandes regiones del cielo para caracterizar las propiedades típicas de la población milimétrica extragaláctica.

La gran apertura del Gran Telescopio Milimétrico, acoplada a sus sensibles cámaras de imagen, produce una velocidad de cartografía que es unas 100 veces más rápida que la de otros telescopios. El Gran Telescopio Milimétrico ofrece un complemento natural a la nueva generación de interferómetros mili-

métricos, como el Gran Conjunto Milimétrico de Atacama (ALMA, por sus siglas en inglés, *Atacama Large Millimeter Array*) o el Conjunto Combinado para la Investigación en Astronomía de Ondas Milimétricas (CARMA, *Combined Array for Research in Millimeter-wave Astronomy*), de mucha mayor resolución pero de campo impracticablemente pequeño como para poder realizar amplias prospecciones del cielo.

La extensa cartografía que desarrollará el Gran Telescopio Milimétrico proveerá de catálogos de objetos para que puedan ser estudiados por estos interferómetros, pondrá en contexto los mapas interferométricos de mayor resolución, y proporcionará la emisión de espaciado nulo, que resulta demasiado extendida como para ser detectada por los interferómetros.

La ciencia

Las razones por las que las observaciones en longitudes de ondas milimétricas son tan importantes se derivan del hecho de que una gran parte de la materia del universo está muy fría (entre 10 y 60 kelvins), y de que al menos la mitad de la energía radiada por astros en el universo consiste en ondas que van de milimétricas a infrarrojas.

En efecto, la distribución espectral de energía del fondo extragaláctico (Figura 2), nos muestra que, dejando a un lado

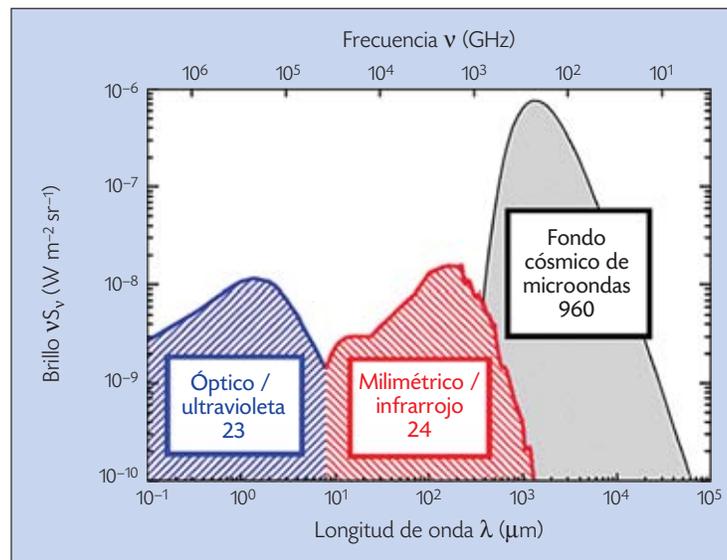


Figura 2. Gráfica del brillo del fondo extragaláctico, en la que se muestra que la mayor componente energética es la del fondo cósmico de radiación de microondas (en gris), y que la emisión integrada de astros tiene igual cantidad de energía en ondas ópticas-ultravioletas (azul) que en ondas milimétricas-infrarrojas (rojo). Adaptado de Dole y colaboradores, 2006.

la radiación cósmica de microondas liberada cuando el universo tenía unos 370 mil años de edad, tras la combinación de los electrones en los átomos, la emisión de luz en el universo se produce preferentemente en dos componentes de aproximadamente igual importancia energética: la que va de luz óptica a ultravioleta, y la que va de luz infrarroja lejana a radioondas milimétricas. Descubrir la composición de las poblaciones de astros que producen la mayor parte de la emisión energética del universo se ha convertido en uno de los incentivos para construir observatorios más y más poderosos.

Mientras que ya en nuestros días se han cartografiado grandes regiones del cielo para determinar que los principales emisores de la luz que va de óptica a ultravioleta son una amalgama de galaxias típicas, galaxias azules en formación y cúasares, la composición de la luz milimétrica es todavía parcialmente un misterio, que espera la entrada en escena de grandes telescopios, como el Gran Telescopio Milimétrico, con sus 50 metros, que nos permitan cubrir grandes áreas del cielo y sobrepasar el límite de confusión de fuentes al que estamos restringidos con la tecnología actual.

A pesar de esta limitante, hoy sabemos que la emisión milimétrica del universo está producida en al menos un 20 a un 50 por ciento por formación estelar virulenta en galaxias masivas en formación, que están fuertemente oscurecidas. El modo de formación oscurecida se perfila, por tanto, como un modo potencialmente predominante en la historia de construcción de las galaxias y, ciertamente, en el ensamble de las galaxias elípticas gigantes.

La formación estelar del universo se localiza principalmente en el medio interestelar de las galaxias, que son zonas donde hay mucho polvo cósmico (condensaciones de silicatos, carbono y otros elementos pesados en granos que van de unas pocas moléculas a aproximadamente 0.1 milímetros) y, por tanto, son regiones fuertemente oscurecidas para las ondas

Uno de los principales objetivos científicos del Gran Telescopio Milimétrico se basa en el aprovechamiento de su alta resolución angular, sensibilidad y velocidad de cartografía para comprender la historia de formación y evolución de las poblaciones de galaxias que dominan la emisión del fondo extragaláctico

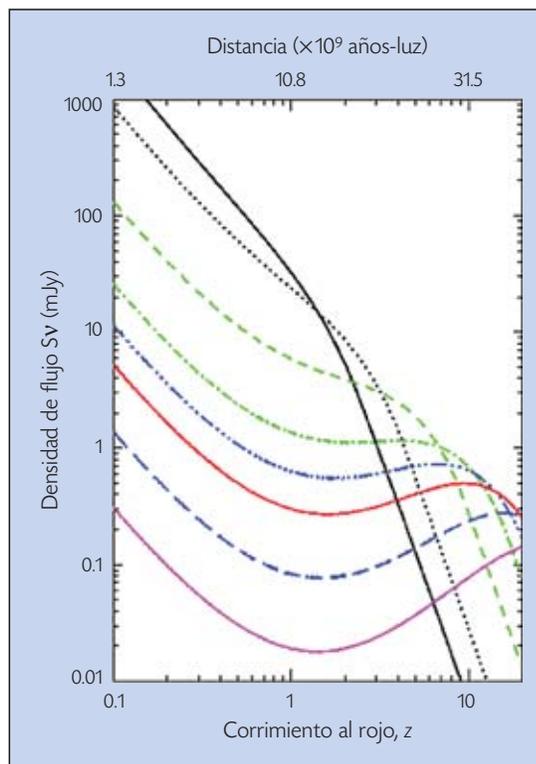


Figura 3. Efecto del corrimiento al rojo sobre la densidad de flujo recibida de una fuente ultraluminosa como Arp220, entre $z = 0.1$ y 11 . De arriba abajo, a $z = 0.2$, las curvas representan la densidad de flujo observada a 160, 250, 500, 850, 1110, 1400, 2100 y 3000 micrómetros, respectivamente.

ópticas. Tal actividad estelar puede pasar inadvertida en prospecciones ultravioletas, visibles e infrarrojas del cielo. Sin embargo, las ondas milimétricas ofrecen una visión casi transparente del cielo, porque son más largas que el tamaño típico de los granos de polvo; 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 controlan la subsiguiente evolución de las galaxias y cúmulos de galaxias que vemos hoy día.

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, y con ello su distancia, el pico de emisión infrarroja se corre hacia el régimen milimétrico, y por lo tanto la luz que se recibe de una galaxia distante ha sido emitida con una densidad de flujo superior a la emitida por una galaxia más cercana (Figura 3).

Esto puede parecer una paradoja, dada nuestra experiencia cotidiana de ver que el brillo de los objetos en ondas ópticas es más y más débil cuanto más los alejamos, como los faros de un auto que a penas se vislumbran en la lejanía. Sin embargo, podemos pensar en un conductor que aumenta la potencia de los focos de su auto al estar lejos, y los disminuye cuando está cerca, de forma que éstos siempre ofrezcan igual iluminación a un transeúnte estacionario. Si esto es así, las observaciones milimétricas pueden trazar la evolución de la formación estelar contenida en galaxias polvosas a lo largo de un gran volumen del universo lejano: en principio, las galaxias se pueden detectar en ondas milimétricas con la misma facilidad a $z = 8$ (a 30 mil millones de años luz de distancia) que a $z = 1$ (tres veces menos distancia), porque tienen el mismo brillo aparente.

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. Uno de los principales objetivos científicos del Gran Telescopio Milimétrico se basa en el aprovechamiento de su alta resolución angular, sensibilidad y velocidad

de cartografía para comprender la historia de formación y evolución de las poblaciones de galaxias que dominan la emisión del fondo extragaláctico.

El Gran Telescopio Milimétrico también se utilizará para realizar grandes programas de investigación en otras áreas de la astronomía, incluyendo el estudio del fondo cósmico de radiación de microondas y sus distorsiones secundarias, la distribución y virulencia de las zonas de formación estelar en galaxias cercanas, la evolución de su medio interestelar, el hoyo negro central de nuestra galaxia, la formación de estrellas en la Vía Láctea, la búsqueda de moléculas orgánicas complejas en el medio interestelar local, y el estudio sistemático de sistemas planetarios en nuestro sol y otros soles cercanos. Una descripción detallada de éstos y otros programas se puede encontrar en el libro del proyecto (Carrasco y colaboradores, 2006). No obstante, como suele ocurrir con todos los grandes avances en instrumentación y tecnología, los descubrimientos más significativos pueden ocurrir, y es deseable que ocurran, en áreas completamente inesperadas.

Explotación actual de la instrumentación del Gran Telescopio Milimétrico

Los primeros instrumentos del Gran Telescopio Milimétrico han sido diseñados, contruidos e integrados principalmente en los laboratorios de la Universidad de Massachusetts en Amherst. Prácticamente toda la instrumentación de primera generación está lista para ser montada, ha sido verificada ya en otros telescopios más pequeños, e incluso está siendo explotada sistemáticamente por equipos científicos integrados por investigadores estadounidenses y mexicanos.

La cámara de continuo del Gran Telescopio Milimétrico (AzTEC, del inglés *Astronomical Thermal Emisión Camera*) es uno de estos instrumentos que está siendo explotado científicamente como instrumento visitante en otros

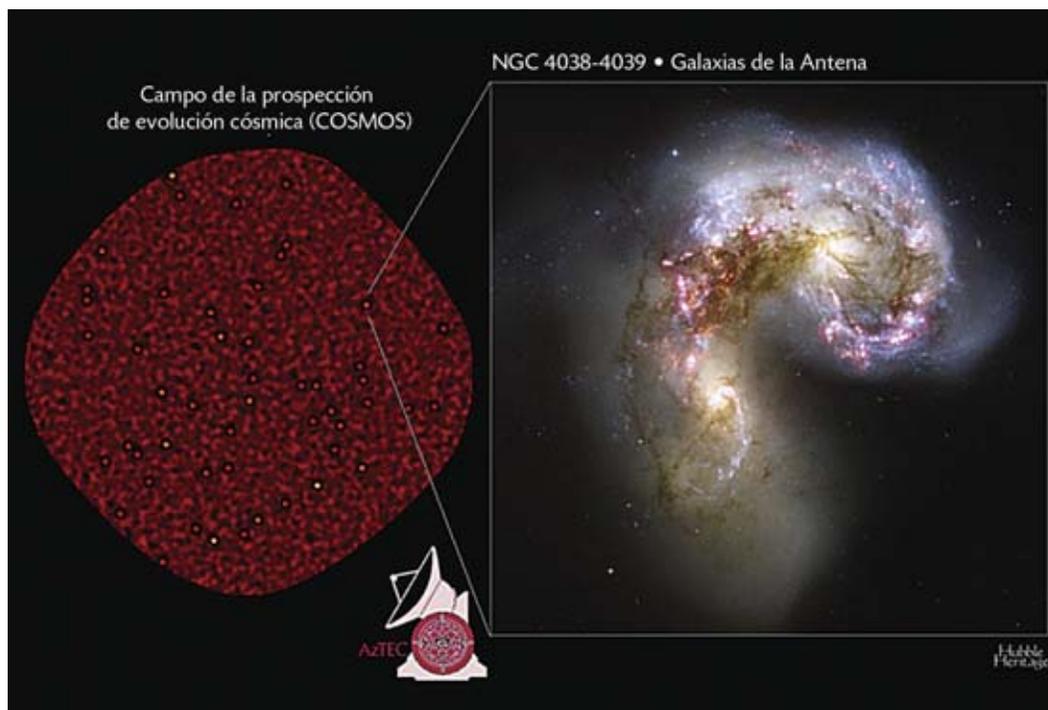


Figura 4. A la izquierda, mapa a 1.1 milímetros de una porción de 0.15 grados cuadrados de la región COSMOS, adquirido en noviembre de 2005 con la cámara AzTEC montada en el telescopio de 15 metros James Clerk Maxwell. Los círculos marcan la posición de galaxias milimétricas con luminosidades mayores a 1 billón de luminosidades solares, a grandes distancias cósmicas, descubiertas con este proyecto. A la derecha, imagen óptica de las galaxias de La Antena, adquirida por el telescopio espacial Hubble. Éstas son galaxias ultraluminosas locales en coalescencia, y se cree son un sistema similar a las galaxias lejanas detectadas por AzTEC.

telescopios. La primera campaña científica de AzTEC se efectuó en la Navidad de 2005-2006 en el telescopio anglo-holandés-canadiense James Clerk Maxwell, de 15 metros, donde adquirió imágenes profundas de casi un grado cuadrado del cielo, proveyendo a la comunidad científica de un catálogo de fuentes extragalácticas que, conjuntamente, duplica los catálogos hasta ahora publicados por otros experimentos milimétricos.

AzTEC se encuentra en estos momentos en el Experimento de Telescopio Submilimétrico Atacama (*Atacama Submillimeter Telescope Experiment*), un telescopio japonés de 10 metros, realizando una serie de prospecciones milimétricas hacia campos extragalácticos sesgados y sin sesgar, marcados o no por la presencia de grandes sobredensidades ya conocidas, como cúmulos de galaxias o radiogalaxias poderosas.

La velocidad de cartografía de AzTEC en telescopios de 10 metros es aproximadamente 20 veces mayor que la de los instrumentos que estos telescopios tenían anteriormente. Si se pudiera utilizar en el Gran Telescopio Milimétrico hoy en día, la velocidad sería otras 20 veces mayor. Es por esto que el advenimiento de la época Gran Telescopio Milimétrico es esperada por la comunidad nacional e internacional con gran expectación, ya que nos permitirá cubrir grandes regiones del cielo, llegando a detectar galaxias de 10 a 100 veces más débiles que las detectadas hoy en día, con las que podamos caracterizar cuál fue el proceso de formación de galaxias normales, como la Vía Láctea, en el universo lejano, entre otros proyectos científicos.

Bibliografía

- Dole, H. y colaboradores (2006), "The cosmic infrared background resolved by Spitzer. Contributions of mid-infrared galaxies to the far-infrared background", *Astronomy & astrophysics*, vol. 451, pp. 417.
- Carrasco, E., I. Aretxaga y W. M. Irving (compiladores) (2006), *El Gran Telescopio Milimétrico: dos países vecinos exploran el cosmos juntos*, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (disponible electrónicamente en www.lmtgm.org).
- Scott, K. S. y colaboradores (2008), "AzTEC millimetre survey of the COSMOS field: I. Data reduction and source catalogue", *Monthly notices of the Royal Astronomical Society*, en prensa.

David H. Hughes es investigador titular del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Desde 2005 ejerce como director científico del Gran Telescopio Milimétrico. Nació en Aldershot, y obtuvo su licenciatura en astrofísica por la Universidad de St. Andrews y su doctorado en astrofísica por la Universidad Central de Lancashire (Gran Bretaña). Su campo de investigación es la astronomía e instrumentación milimétrica, con un fuerte interés por la formación y evolución de las grandes estructuras del universo: cúmulos de galaxias y galaxias en formación. Trabaja y vive en México desde 1999. dhughes@inaoep.mx

Itziar Aretxaga es investigadora titular del INAOE y miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Nació en Bilbao, España. Obtuvo su licenciatura en física por la Universidad Complutense de Madrid y su doctorado en física por la Universidad Autónoma de Madrid. Su campo de investigación es la formación y evolución de galaxias, y la simbiosis entre la formación estelar y la actividad nuclear de galaxias. Trabaja y vive en México desde 1998. itziar@inaoep.mx



Telescopio espacial Hubble. © NASA