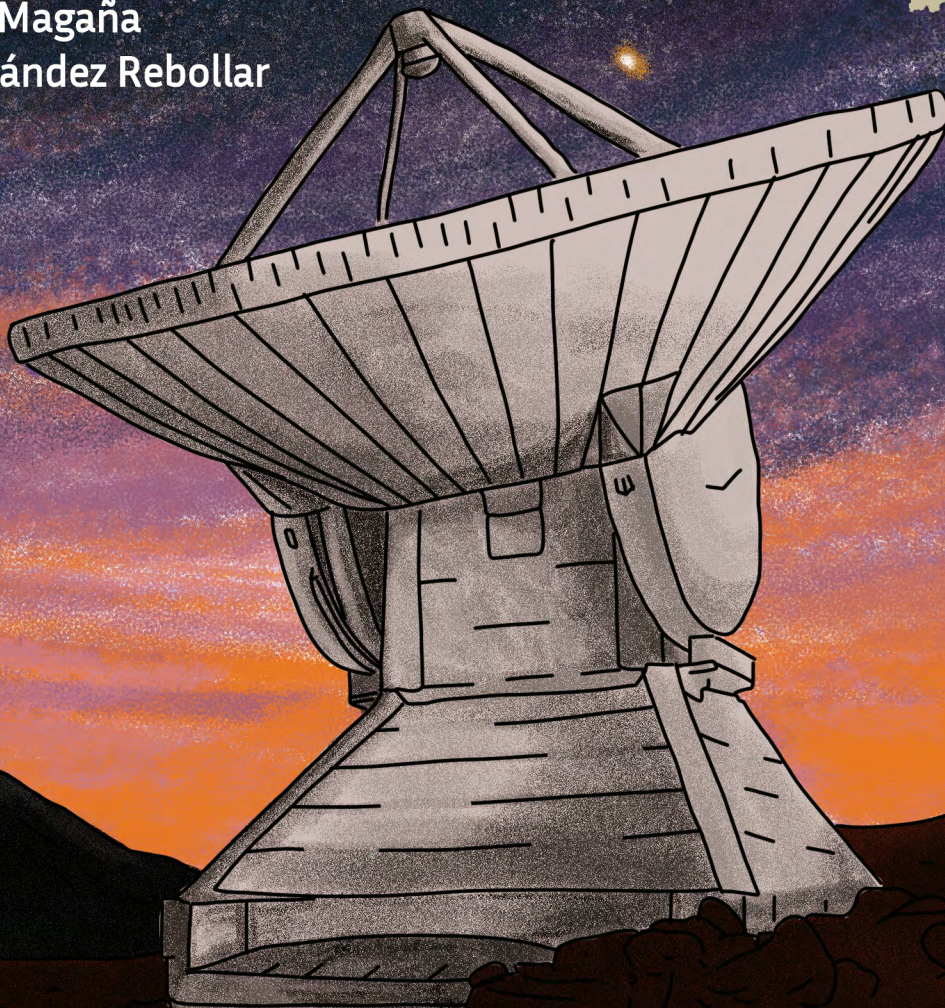


El Gran Telescopio Milimétrico en el estado de Puebla, México, centro de la primera fotografía del agujero negro

César Arteaga Magaña
José Luis Hernández Rebollar



Gobierno de Puebla
Hacer historia. Hacer futuro.



**Secretaría
de Educación**

CONCYTEP

Consejo de Ciencia
y Tecnología del Estado
de Puebla

El Gran Telescopio Milimétrico en el estado de Puebla, México, centro de la primera fotografía del agujero negro

César Arteaga Magaña
José Luis Hernández Rebollar



Gobierno de Puebla
Hacer historia. Hacer futuro.



**Secretaría
de Educación**

CONCYTEP

Consejo de Ciencia
y Tecnología del Estado
de Puebla

Agradecemos el apoyo de CONCYTEP en especial
de su director Doctor Victoriano Covarrubias Salvatori para la
realización de esta investigación.

Al doctor David Hughes
Director del GTM

Al doctor David Gale
Investigador Titular del INAOE
asignado al GTM encabezando el equipo de medición del GTM

Al doctor Miguel Chávez Dagostino
Investigador del INAOE

A la ingeniera Janina Nava
Coordinadora de difusión y medio ambiente del GTM y Hawc

Al Ingeniero Felipe Quintero
Grupo Cemex

Al Arquitecto Ramón Osorno
Concretos Angelópolis S. A. de C.V.

**Lista de las principales empresas
involucradas en el desarrollo**

MAN Technologies Alemania
Antedo USA
Media Lario S.r.l. Italia
Symétrie Francia
A.D.S. International S.r.l. Italia
ESEASA Construcciones México
Pailería de San Luis Potosí México
Cosmos México
Ciateq México
CEMEX
Springer GmbH Alemania

Miguel Barbosa Huerta

Gobernador Constitucional del Estado de Puebla

María del Rosario Orozco Caballero

Presidenta del Sistema Estatal para el Desarrollo Integral de la Familia

Ana Lucia Hill Mayoral

Secretaria de Gobernación del Estado de Puebla

Melitón Lozano Pérez

Secretario de Educación del Estado de Puebla

Sergio Salomón Céspedes Peregrina

Presidente de la Junta de Gobierno y Coordinación Política H. Congreso del Estado Libre y Soberano de Puebla

Héctor Sánchez Sánchez

Presidente del Tribunal Superior de Justicia del Estado de Puebla

Victoriano Gabriel Covarrubias Salvatori

Director General Del Consejo De Ciencia Y Tecnología Del Estado De Puebla

Maricruz Vázquez Bañuelos

Responsable del Área de Publicaciones

Georgilett Pérez Bedwell

Responsable del Área de Publicaciones

Luis Gerardo Aguirre Rodríguez

Diseñador Editorial

Karla Rodríguez Rosas

Diseño de Portada

Diego Rodrigo Franco Ambriz

Revisor de estilo

Lorenia Polet Domínguez Martínez

Revisora de estilo

México, 2022.

Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla (CONCYTEP) Privada B Poniente de la 16 de Septiembre. 4511, Col. Huexotitla, 72534. Puebla, Pue.

ISBN: 978-607-8839-13-1

La información contenida en este documento puede ser reproducida total o parcialmente por cualquier medio, indicando los créditos y las fuentes de origen respectivas. Las opiniones expresadas en ésta reflejan el punto de vista de los investigadores y no los de la institución.

Índice

• •	Introducción	1
• • •	CAPÍTULO I..... Cómo el Estado de Puebla logró tener el Radiotelescopio de ondas milimétricas más grande del mundo, y se convirtió en el centro de la primera fotografía obtenida de un agujero negro	5
• • •	CAPÍTULO II ¿Por qué un radiotelescopio?	19
• • •	CAPÍTULO III..... El asunto económico	23
• • •	CAPÍTULO IV Impacto social	29
• • •	CAPÍTULO V..... El Gran Telescopio Milimétrico	33
• • •	CAPÍTULO VI Beneficios sociales	85
• • •	CAPÍTULO VII..... Logros	91

•		
•	CAPÍTULO VIII	99
•	Event Horizon Telescope o cómo ver lo invisible	
•		
•	CAPÍTULO IX.....	107
•	Futuro y Conclusiones	

•		
•	Bibliografía	109
•		
•	Referencias electrónicas.....	110
•		
•	Referencias electrónicas.....	111
•		

Introducción

El Gran Telescopio Milimétrico es el proyecto científico más importante en la historia de México. Ha sido comparado con lo que fue para los Estados Unidos el proyecto del alunizaje en los años sesenta. Este gran proyecto nació de una colaboración de carácter académico entre las instituciones científicas del INAOE (Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica) en México y la Universidad de Massachusetts, Amherst (UMass) en EEUU. Cuando los investigadores de ambas instituciones trabajando juntos se dieron cuenta de lo importante, útil y necesario que sería poder contar con un radio telescopio capaz de observar o detectar longitudes de onda entre uno y tres milímetros, pero que, además, fuera suficientemente grande para detectar las radiaciones de los confines más lejanos del universo, las cuales provienen del pasado remoto, tan remoto que corresponden a la formación de las galaxias y del propio universo. Con un instrumento así no sólo se podría observar el pasado remoto sino detectar la huella digital que dejaron las formaciones galácticas en el universo temprano como nunca antes se había visto. Además, sería posible detectar las emisiones de moléculas orgánicas en la vecindad solar, moléculas que son la base de la vida. El proyecto se presentaba en realidad como algo magnífico pues permitiría asomarse por primera vez a ver lo nunca antes visto por el ser humano. Sería como revivir la experiencia de Galileo cuando por primera vez en la historia se asomó a escudriñar el cielo con el telescopio que él mismo había construido, y descubrió cosas como los cráteres de la Luna, los satélites de Júpiter y las fases de Venus.

Con esta motivación en mente los científicos del INAOE y de la UMass se dieron a la tarea de conseguir los recursos para el proyecto, así como de buscar el sitio adecuado para semejante radiotelescopio que a la postre se convertiría en el radiotelescopio de ondas milimétricas más grande del mundo. La búsqueda de los recursos es una tarea de tipo político administrativo, complicada aún más por el hecho de tratarse de un proyecto binacional en el que intervienen dos países, dos instituciones y dos gobiernos. Sin embargo, la buena voluntad y los deseos de llevar a cabo

el proyecto han convertido al Gran Telescopio Milimétrico (GTM) en el mayor proyecto científico jamás efectuado entre México y Estados Unidos.

En cuanto a la búsqueda del sitio para instalar el telescopio, quedó claro desde un principio que debía ser en territorio mexicano. Las razones más importantes son que un telescopio debe estar en un lugar que permita la observación de la mayor parte del cielo, así que entre más al norte se encuentre, mayor será la cantidad de cielo del sur que el telescopio no puede observar, así un telescopio en el polo norte nunca podrá ver nada más al sur del ecuador celeste, mientras que un telescopio en el ecuador verá tanto los cielos del norte como los cielos del sur. Entonces sería lógico pensar que la mayoría de los telescopios deberían estar en el ecuador terrestre. Sin embargo, Ecuador es un sitio muy malo para la observación astronómica ya que casi siempre está nublado. Por lo tanto, un mejor lugar para la colocación de un telescopio es aquel que esté lo suficientemente al sur para ver los cielos del sur, pero lo suficientemente al norte para gozar de una buena cantidad de noches despejadas para la observación. El otro punto importante es la altura sobre el nivel del mar que el sitio debe tener porque la luz o la radiación proveniente del espacio se va debilitando al atravesar las capas de la atmósfera, y en consecuencia, entre más alto se esté sobre el nivel del mar menor será la capa de atmósfera que la radiación tenga que atravesar antes de llegar al telescopio. Por lo tanto, la búsqueda del sitio se concentró en las montañas más altas de México. Se tomaron en cuenta muchos sitios, entre ellos los observatorios de San Pedro Mártir en Baja California y el Observatorio Guillermo Haro en Cananea, Sonora. Finalmente, después de mucha búsqueda se decidió colocar el telescopio en la cima de la montaña Tliltépetl o Sierra Negra, muy cercana al Pico de Orizaba. Esta montaña había pasado inadvertida muchas veces por estar tan cerca del Pico de Orizaba. Su magnitud se ve disminuida frente al coloso de Orizaba, pero resulta ser la cuarta montaña más alta del país con 4 600 metros sobre el nivel del mar.

Una vez decidido el sitio hubo necesidad de hacer un camino de acceso hasta la cima. Esto la convirtió en la montaña más alta del país a cuya cima se puede llegar por completo con un vehículo. El GTM se planeó para ser construido en su mayor parte en México, pero dada la importancia y la precisión del instrumento se recurrió a la sólida experiencia de empresas alemanas para el diseño y el análisis estructural del telescopio.

El GTM es una antena de 50 metros de diámetro, con un peso de más de 3 000 toneladas, que se mueve sobre dos ejes principales: el eje de azimut y el eje de elevación. Estos movimientos conjugados y coordinados por computadora le permiten seguir la trayectoria aparente de un objeto en el cielo para observarlo durante largos periodos de tiempo y así recolectar información. La superficie de la enorme antena está formada por 180 paneles reflectores que a su vez se componen de 8 subpaneles construidos con el método de electrodeposición de níquel. Cada panel está montado sobre una estructura iso-estable, que a su vez se monta en cada esquina sobre cuatro actuadores motorizados que comandados por computadora pueden corregir y mantener la forma de la superficie colectora de la antena, compensando las deformaciones causadas por la gravedad, los gradientes térmicos y la carga de viento. La superficie total es de 2 000 metros cuadrados y la precisión de la misma debe estar dentro de 70 micras de RMS, que es la condición óptica para observar en las longitudes de onda milimétricas. Esto quiere decir que las irregularidades en toda la superficie de la antena no deben sobrepasar un promedio de 70 micras. En el foco primario de la gran antena parabólica, sostenido por un tetrápodo se encuentra un espejo secundario de forma hiperbólica que regresa el haz de radiación hacia un agujero en el centro de la antena, y lo refleja hacia los detectores por medio de un espejo terciario, cuya posición también está controlada por computadora.

Los instrumentos detectores del GTM son por derecho propio de la más alta tecnología, desarrollados para recibir y analizar la radiación recibida en el rango de longitud de onda de uno a tres milímetros.

El telescopio en sí, es un gran edificio móvil de 53 metros de altura. El eje de azimut hace rotar concéntricamente a todo el edificio gracias a un gran balero o cojinete de 4.2 metros de diámetro en la punta de un tronco cono de 20 metros. El tener el balero a esa altura del edificio reduce las flexiones del mismo y hace que el giro sea más preciso. Del nivel del balero parten cuatro patas que forman la alidada, y que descansan sobre 16 ruedas metálicas motorizadas, cuatro por cada pata, asentadas sobre una pista de acero de 120 metros de circunferencia, que además está nivelada dentro de una tolerancia de tres décimas de milímetro para asegurar que el telescopio rote dentro de los parámetros deseados de precisión. Esta estructura fundamental del telescopio se denomina alidada inferior. A 30 metros de altura sobre la alidada está la alidada superior donde se colocaron las chumaceras sobre las

que gira la antena en su movimiento de elevación. Ochocientas toneladas de antena con sus respectivos contrapesos en forma de medialunas a cada lado se mueven por cuatro motores de elevación, dos de cada lado, con pares encontrados para evitar el juego de regreso conocido como *backlash*. Dos grandes cremalleras engranadas de elevación, una a cada lado de la antena, transmiten la fuerza para mover la magnífica antena con la precisión astronómica requerida. Hay codificadores de posición en cada uno de los ejes y detectores térmicos en varios puntos de la estructura y todos los instrumentos conectados a la computadora que celosamente vigila todos los movimientos y condiciones del enorme instrumento.

El edificio móvil consta de tres pisos principales. En el primer piso, al nivel de 20.70 metros, están las computadoras y todos los servo sistemas; el segundo piso, o nivel 25 metros, es el cuarto de observación; mientras que en el tercer piso, o nivel 29 metros, están los detectores e instrumentos recibiendo la información del cosmos. En el sótano están las recámaras, la cocina, el cuarto de estar, el almacén y la recepción.

Las condiciones de trabajo en la montaña no son nada fáciles. Las temperaturas oscilan entre los cinco y los menos cinco grados centígrados, pero lo más incómodo es la falta de oxígeno. A esa altura el aire es tan escaso en oxígeno que es necesario contar con áreas enriquecidas con oxígeno, tales como el cuarto de observación, las recámaras y la sala de estar. Sin embargo, estos inconvenientes, y los enormes esfuerzos realizados para construirlo pasan a segundo plano ante la emoción, la importancia y el orgullo de estar en el Gran Telescopio Milimétrico, el radiotelescopio de ondas milimétricas más grande del mundo.

CAPÍTULO I

Cómo el Estado de Puebla logró tener
el Radiotelescopio de ondas milimétricas
más grande del mundo, y se convirtió
en el centro de la primera fotografía
obtenida de un agujero negro

*El GTM Gran Telescopio Milimétrico; antecedentes,
aportaciones científicas y su entorno social y
científico inmediato*

Breve historia de la astronomía en México

¡México...! Pocos países pueden tener un nombre tan relacionado a los cielos como México. En el lenguaje de los aztecas, primeros fundadores de lo que llegaría a ser nuestro país, la palabra México procede de los vocablos *metztli* que significa Luna y *xictli* que significa ombligo. Por lo que México puede ser entendido como “En el ombligo de la Luna” lo que ya de por sí nos coloca en los cielos. Algunas versiones dicen que los lagos alrededor del asentamiento de la gran Tenochtitlan semejaban mucho al conejo que se percibe formado por la geografía de la Luna, por lo que la gran Tenochtitlan parecía ubicarse en el ombligo del supuesto conejo. Como sea, la palabra México nos refiere a la Luna y en consecuencia a los cielos, esos cielos ya observados por los antiguos pobladores del México central y a los cuales dedicaron la construcción de las pirámides del Sol y de la Luna, alineadas con conceptos y precisión astronómica en Teotihuacan muchos años antes de la llegada de los aztecas.

Habiendo nacido México de una ancestral cultura que observaba y estudiaba los cielos, es uno más de los países que como muchos otros basaron gran parte de su cultura y desarrollo en la observación metódica de los cielos, es decir, en la astronomía. No sólo los Aztecas de la altiplanicie mexicana eran observadores del cielo sino también varias culturas prehispánicas, destacándose los Mayas que con sus observaciones lograron desarrollar un calendario bastante preciso, la construcción de edificios con fines astronómicos como el famoso observatorio del caracol y el desarrollo de un sistema de numeración que introduce el concepto del cero, un número que representa el vacío o la ausencia de valor y que es de gran importancia en el desarrollo de la matemática. No fueron sólo los habitantes de Mesoamérica los que utilizaron el cero, también se sabe que se desarrolló en Babilonia, el antiguo Egipto y la antigua Grecia, pero en esos tiempos no había comunicación posible entre esas civilizaciones ni coincidencias en tiempo. Lo que sí es importante es que el desarrollo del número cero es consecuencia de la observación celeste, es decir, de la astronomía.

Muchas culturas alrededor del mundo se destacan por sus registros y observaciones celestes, que siempre son coincidentes entre sí, lo que demuestra la universalidad de los fenómenos celestes y la capacidad de observación y registro de las diferentes culturas mundiales a través de los tiempos.

Por eso se dice que la astronomía es la ciencia más antigua de la humanidad, y tendría que serlo, ya que de la observación de los fenómenos celestes dependía en gran parte la supervivencia de los hombres. Ya sabemos la importancia de poder predecir las épocas del año como las estaciones, la llegada de las lluvias, el desbordamiento de los ríos, los mejores momentos para la cacería y la pesca, sin mencionar las estrategias y tácticas militares que también requerían de la información astronómica más precisa posible. Con el paso de los años y la depuración de las observaciones, fue cada vez más y más importante conocer las posiciones del Sol, la Luna, las constelaciones y las estrellas para el desarrollo de la vida y el progreso de la humanidad.

Pero a la astronomía le hacía falta una herramienta poderosa, un instrumento que le permitiera observar mejor y más de cerca los fenómenos celestes. Con el tiempo se desarrollaron instrumentos como el astrolabio, el sextante, el cuadrante, la brújula, el gnomon, etc. para determinar posiciones y horarios con mayor precisión.

El gnomon es una simple vara enterrada verticalmente en el suelo que proyecta su sombra en el plano del suelo, con eso se puede saber con bastante precisión la hora del día. Pero sorprendentemente esta simple vara le sirvió al genio griego Eratóstenes para calcular la circunferencia de la tierra en el siglo tres antes de cristo con una precisión increíble. Cristóbal Colón no conocía esa medición, pues creía que la tierra era mucho más pequeña, de haberlo sabido, jamás se hubiera atrevido a hacer su famoso viaje de descubrimiento.

Con los instrumentos disponibles del siglo XVI se construyó el observatorio astronómico más avanzado de la época, el Uraniborg, en Dinamarca, para el famoso astrónomo Tycho Brahe, que pudo establecer posiciones celestes con gran precisión. Pero a la astronomía le hacía falta el instrumento clave para ver más de cerca todos los fenómenos, necesitaba la maravilla del telescopio. Si pensamos que una simple vara enterrada en el suelo y unas matemáticas que actualmente son de nivel de primaria, le permitieron a Eratóstenes calcular el tamaño de la tierra, ¿hasta dónde podemos llegar con el GTM, el radio telescopio de ondas milimétricas más grande del mundo y con la capacidad matemática y de cómputo actual, aunado a la capacidad científica e inventiva de nuestros científicos e ingenieros? Esto convierte al GTM en el instrumento científico más potente jamás logrado en la historia de nuestro país.

Astronomía durante la colonia

Durante la época colonial la astronomía en la Nueva España se desarrollaba bajo el control de la corona española. Sin embargo, es entonces cuando se destacó por primera vez la privilegiada posición geográfica de México para la observación astronómica. Situado entre los 14 y 31 grados de latitud y sobre todo con altiplanicies que superan los dos mil metros sobre el nivel del mar, es un lugar excelente para observar por muchas noches los cielos oscuros del hemisferio norte y buena parte del hemisferio sur. Las grandes alturas de la altiplanicie se encuentran en la proximidades de los 18 a 20 grados de latitud, lo que permite tener muchas noches limpias, oscuras y despejadas para observar, aprovechando que en esa época no se habían contaminado los cielos ni por humos, ni por exceso de luz artificial, el espectáculo nocturno en México durante la colonia debió ser impresionantemente hermoso y útil para las observaciones.

Se conoce poco acerca de la astronomía colonial, sólo los navegantes que llegaban al nuevo mundo tenían el conocimiento práctico propio de la navegación en el uso de instrumentos. El monje Alonso de la Veracruz en el año 1540 fue el primero en llegar a explicar conceptos astronómicos en Michoacán, aunque estos conceptos se basaban en la teoría geocéntrica. En 1557 ya era profesor en la Real y Pontificia Universidad de México, donde publicó el libro *Physica speculatio*, y a pesar de enfocarse en la teoría geocéntrica, mencionaba la astronomía heliocéntrica. En 1609 Enrico Martínez publicó una primera lista de ocurrencia de eclipses de 1606 a 1620, adecuados a la posición de la ciudad de México.

La Real y Pontificia Universidad de México abrió la primera cátedra de astronomía en 1637 a cargo de Diego Rodríguez, monje que no sólo la impartió por treinta años sino que también pudo construir algunos instrumentos de observación. Se puede considerar que esta es la primera vez que se construyen en la Nueva España.

Carlos de Sigüenza y Góngora fue el primer profesor de astronomía y matemáticas que usó un telescopio en México para fines científicos, defendió la existencia de los cometas, además de negar las interpretaciones astrológicas de las posiciones celestes, por lo que es considerado como el primer astrónomo formal de México.

La primera publicación internacional de una observación astronómica hecha en México fue el reporte del tránsito de Venus observado en Baja California el 3 de junio de 1769 por un grupo de astrónomos de Europa y México.

A partir de 1796 se logró enseñar regularmente física, matemáticas, química y astronomía, principalmente en el seminario de minería.

Astronomía del México independiente

Al consumarse la Independencia de México en 1821 el nuevo país estaba devastado y cansado de la lucha. Las actividades científicas, como todas las demás, debían comenzar a la luz de un nuevo camino y bajo la nueva nación. No fue sino hasta 1862, año de la gran batalla de Puebla contra las fuerzas de intervención francesas, cuando por primera vez surge la idea de crear un observatorio en México, a

instancias del Ingeniero Francisco Díaz Covarrubias. El presidente Benito Juárez hizo el primer intento de construir un observatorio astronómico, pero las condiciones económicas del país y la intervención francesa lo impidieron. Ya desde entonces se había pensado en colocarlo en la parte superior del castillo de Chapultepec que para ese entonces se consideraba alejado de la ciudad de México en medio de un denso bosque, lo que cumplía con las condiciones necesarias para las observaciones de esa época, ya que estaba libre de contaminaciones lumínicas y de emisiones. Para complicar aún más las posibilidades de instalar el observatorio en Chapultepec, el invasor Maximiliano decidió instalar su residencia allí, aunque por otro lado y a instancias de la emperatriz Carlota se ordenó la construcción de una hermosa avenida, con características europeas, que conectara el castillo con la ciudad. En la actualidad es la avenida Paseo de la Reforma, una de las más bellas del mundo.

La astronomía mexicana salvó a México de perder demasiado territorio cuando perdió la guerra ante Estados Unidos, ya que los destacados ingenieros mexicanos José Salazar y Francisco Jiménez, con amplios conocimientos en astronomía, formaron parte de la comisión verificadora de los límites geográficos que en 1858 estableció correctamente los puntos de la línea fronteriza evitando un mayor despojo de tierras mexicanas. Puede que este hecho sea el primer beneficio nacional logrado por la ciencia Mexicana, ya que vendrían muchos más logros y beneficios de enorme importancia, para el país y el mundo entero.

En esos tiempos de nuestra joven nación la astronomía mexicana se posicionó en el mundo gracias a la formación de la comisión astronómica mexicana que vio su oportunidad de aparecer en el ámbito internacional cuando realizaron un viaje casi imposible en esos tiempos para observar el tránsito de Venus en Japón, organizado por Díaz Covarrubias. El fenómeno tuvo lugar el 9 de diciembre de 1874 y la comisión mexicana pudo reportar los resultados y mediciones de sus observaciones a nivel mundial.

Cuatro años más tarde, el 5 de mayo de 1878, fecha tan significativa para la nación, se inauguró el observatorio astronómico nacional en el Castillo de Chapultepec. Gracias a que desde un par de años antes Vicente Riva Palacio, ministro de fomento de Porfirio Díaz, comisionó a los ingenieros Ángel Anguiano y Francisco Jiménez para instalar los observatorios meteorológicos y astronómicos en el palacio de

Chapultepec. Con este observatorio se hicieron las primeras investigaciones astronómicas rigurosas en el país, comenzando con la observación y registro del tránsito de Mercurio en su primer día de observaciones.

La siguiente observación importante fue el tránsito de Venus de 1882, para lo cual ya se logró la asignación de recursos para comprar nuevos telescopios en Alemania. No obstante, casi desaparece el observatorio cuando Riva Palacio dejó su cargo y sólo se salvó porque ya se había invertido bastante dinero en él, pero se mudó a Tacubaya en el antiguo arzobispado. Tacubaya se convirtió por muchos años en la sede de la astronomía mexicana. Hasta nuestros días se sigue mencionando a Tacubaya por su observatorio que también produjo grandes beneficios y verdaderos y grandes astrónomos mexicanos.

Un golpe de suerte bien merecido por los logros y publicaciones internacionales de este observatorio fue la invitación a formar parte de un grupo de veinte observatorios del mundo para fotografiar diferentes zonas de la bóveda celeste, repartiendo la tarea entre los diferentes observatorios, a iniciativa del observatorio de París, después del congreso astrográfico de 1887. El objetivo era fotografiar todas las estrellas posibles hasta la magnitud 11, y así formar un mapa celeste, denominado en francés como proyecto *Carte du ciel*. Participaron con Tacubaya observatorios tan importantes como Greenwich, el observatorio Vaticano, Sicilia, Helsinki, París, Córdoba en Argentina, Perth en Australia, España, Edimburgo, Sydney y muchos más.

Para cumplir con la tarea encomendada a México, el gobierno adquirió un telescopio astrográfico fabricado a la compañía Grubb de Dublín Irlanda. El instrumento llegó a México en 1899 y se terminó de instalar en Tacubaya en 1890. De inmediato se empezaron a obtener fotografías de la parte del cielo asignada a México en una labor que duró más de 50 años, con la que se lograron obtener más de 2 500 placas en las que se registraron más de 312 000 estrellas, siendo México el tercer país con más estrellas registradas, además de ser el único país que completó la tarea de fotografiar el área asignada al cien por ciento.

Para completar esta enorme tarea, el telescopio “Carta del cielo” tuvo que ser transportado a Tonantzintla, Puebla en 1951, donde ya se había mudado el Observatorio Astronómico Nacional desde 1942. Las condiciones de luminosidad,

superpoblación y contaminación de Tacubaya ya no permitían hacer observaciones de alta calidad. Fue así como el estado de Puebla con la influencia y ayuda del presidente Poblano Manuel Ávila Camacho convirtió al estado en el Centro Nacional de la Astronomía. Años más tarde el foco de atención mundial de la astronomía y la astrofísica sería Tonantzintla y el estado de Puebla.

En efecto, Luis Enrique Erro, gran astrónomo mexicano, fundador del Instituto Politécnico Nacional y el director del Observatorio de Tacubaya, solicitó al presidente Ávila Camacho la construcción de un Observatorio Nacional en un lugar más adecuado y menos contaminado que Tacubaya. El presidente puso como condición que se hiciera en su estado natal de Puebla. Así Tonantzintla fue elegida como el sitio ideal para la instauración del Observatorio Astronómico Nacional, inaugurado el 17 de febrero de 1942. Teniendo un gran futuro por delante gracias a grandes astrónomos y grandes descubrimientos logrados en este observatorio poblano.

Tonantzintla, Puebla era un pequeño pueblo a pocos kilómetros de la ciudad Capital del estado de Puebla. Estaba destinada a ser conocida mundialmente por los descubrimientos astrofísicos que tendrían lugar ahí. Con una colina lo suficientemente alta para observar los horizontes, era un buen sitio para instalar los telescopios del Observatorio Astronómico Nacional. Comenzó a vivir sus años de gloria prácticamente desde su inauguración a la que asistieron, además del propio presidente Ávila Camacho, el Gobernador Gonzalo Bautista, y sus comitivas, grandes astrónomos internacionales como el famoso Harlow Shapley de la universidad de Harvard, quien colaboraba con Erro en diferentes investigaciones y que además había recibido al joven Guillermo Haro en su observatorio de Harvard para trabajar con él y capacitarse. Guillermo Haro, como veremos, se convertiría en el futuro en el astrónomo más importante, famoso y productivo de México. El doctor Guillermo Haro, a su regreso de Harvard, llegó a ser director del observatorio de Tacubaya y también del de Tonantzintla, fundó el CONACYT y el Fondo de Cultura Económica, y llegó a ser el primer latinoamericano vicepresidente de la American Astronomical Society.

Por entonces se tenía en Tonantzintla un telescopio reflector de un metro de diámetro, adquirido con la ayuda financiera de las fundaciones Rockefeller y Jenkins. Se instaló también la que llegaría a ser la cámara astrográfica más famosa del mundo,

un telescopio dedicado a obtener fotografías del cielo de alta calidad, en placas de vidrio de gran formato. La cámara se tuvo que instalar provisionalmente en un edificio situado en la parte más alta de la colina debido a la necesidad de comenzar a trabajar y a la falta de recursos. Sin embargo, esto no detuvo el gran ánimo de los astrónomos encabezados por Guillermo Haro para obtener las placas que lo hicieron famoso. Posteriormente, ya se pudo construir un edificio más adecuado para colocarla. Esta cámara llegó a ser uno de los instrumentos más avanzados del mundo en su época y en manos de Haro y colaboradores fue capaz de obtener más de 16 000 placas con las que se hicieron importantes descubrimientos como los objetos Haro-Herbig, Nebulosas planetarias, estrellas ráfaga y hasta los famosos cuásares; incluso se formó un catálogo de estrellas conocido como el catálogo de Tonantzintla, y desde entonces todas las estrellas catalogadas así llevan el prefijo TON en su nomenclatura.

Todos estos desarrollos y descubrimientos le valieron a Guillermo Haro para ser galardonado con la Medalla Lomonósov que otorgaba la Unión Soviética y que es considerada como el premio Nobel de la astronomía. Además, fue el miembro más joven del Colegio Nacional. Son innumerables los galardones y logros del gran Guillermo Haro, lo importante es que la mayor parte de su fecundo y exitoso trabajo fue realizado en Tonantzintla, Puebla.

Además de tener el telescopio de un metro, la cámara de Schmidt y el telescopio del proyecto carta del cielo mudado desde Tacubaya, en el observatorio Astrofísico de Tonantzintla se instaló un telescopio solar, con una peculiar historia: resulta que Luis Enrique Erro a la sazón director del observatorio padecía de sordera, y el presidente Lázaro Cárdenas le dio una suma de dinero para curar su sordera. Erro, en vez de curar su sordera, usó ese dinero para adquirir este telescopio solar que permite hacer observaciones seguras de la evolución solar. El telescopio solar está aún en funciones en Tonantzintla. Con este equipo el observatorio de Tonantzintla se convirtió en el mejor y más moderno de México, y primero de Latinoamérica conocido mundialmente por sus capacidades técnicas científicas y humanas. Pero Guillermo Haro, como su director se dio cuenta de la necesidad de promover el estudio de la ciencia y lograr una nueva generación de astrónomos profesionales que pudieran desarrollar sus investigaciones de vanguardia en México y promovió la obtención de becas en el extranjero para muchos estudiantes que debían

graduarse allá y regresar a México a laborar y formar nuevos grupos de trabajo. Su plan fue exitoso ya que una vasta generación de astrónomos, ópticos y electrónicos resultaron becados y graduados en varios países gracias a la ayuda de Haro. Además, Guillermo Haro se percató que muy pronto el crecimiento de la ciudad de Puebla con su cada vez más grande población acabaría por deteriorar la calidad del cielo nocturno de Tonantzintla debido a la contaminación de luz y de emisiones, por lo que comenzó a planear la fabricación e instalación de un nuevo telescopio en una zona muy oscura del país. Eligió junto con sus colegas de la UNAM una montaña alta en la sierra de San Pedro Mártir de Baja California, un lugar que aún en nuestros días goza de cielos nocturnos espectaculares. Pero tuvo que dejar el proyecto en manos de la UNAM para su total realización. Entonces en Tonantzintla decidió buscar la forma de hacer otro telescopio de dos metros en otro sitio adecuado, pero esta vez con la idea de fabricar en México la mayor parte de sus componentes. Se trataba de una tarea titánica, para la cual se necesitaba un equipo multidisciplinario de expertos en óptica, electrónica e ingeniería. Haro decide entonces expandir las actividades del observatorio y crea el INAOE, Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, como una entidad multidisciplinaria capaz de llevar a cabo tareas en estas áreas de la ciencia y así convertir el proyecto de fabricar el nuevo telescopio en México. El INAOE es el primer centro de investigación del Conacyt y el primero también en estar situado fuera de la capital del país, específicamente en Tonantzintla, Puebla.

Después de prospeccionar en varios sitios como si fuese un minero en busca de una mina de estrellas, decide que una montaña de 2 500 metros sobre el nivel del mar en la ciudad minera de Cananea en el estado de Sonora reúne las condiciones necesarias de logística, altura oscuridad y cantidad de noches despejadas. Con un tejo de vidrio de calidad óptica donado por la Universidad de Arizona decide tallar y pulir el espejo del telescopio en el INAOE en Puebla, tarea nunca antes hecha en el país, y además desarrollar la electrónica para el control del telescopio. Seis años fueron necesarios para producir el espejo y cinco más para tener el telescopio instalado en Cananea. Fue un arduo trabajo realizado por un gran grupo de expertos en óptica, electrónica e ingeniería desarrollados en el INAOE, que además dejó un aprendizaje técnico y científico para las nuevas generaciones tanto de Sonora como de Puebla. Este nuevo observatorio se convertiría en el telescopio óptico más grande de México y llevaría la investigación astrofísica del INAOE a mayores niveles de

competencia internacional. Lamentablemente, el gran Guillermo Haro murió poco antes de ver terminado su observatorio. Actualmente, es nombrado Observatorio Astrofísico Guillermo Haro en honor al gran mexicano que tanto hizo por la ciencia y la tecnología nacional.

El INAOE continuó a la vanguardia de la investigación científica en las disciplinas de astrofísica, óptica y electrónica, graduando, desde entonces hasta la actualidad a estudiantes de maestría y doctorado en estas disciplinas. Pero lo mejor estaba por venir: el proyecto que llevaría al INAOE, a México, a Tonantzintla y al estado de Puebla a las fronteras y niveles más altos de la ciencia mundial, y pondría a Puebla en el centro de la primera fotografía obtenida de un agujero negro.

La Colaboración entre dos países vecinos, a veces distantes, se manifiesta en el cielo, y da como resultado el Gran Telescopio Milimétrico (GTM)

Los astrónomos mexicanos y estadounidenses tienen una interesante historia de colaboraciones en la astronomía. Ya desde 1904 Joaquín Gallo, director del observatorio nacional, visitó el observatorio de Yerkes, de la Universidad de Chicago, luego viajó al congreso de la Sociedad Astronómica Norteamericana y a la reunión de astrónomos participantes en la observación del eclipse de 1924. Gallo hizo buenas amistades con sus colegas estadounidenses y fue elogiado por el famoso Harlow Shapley por los resultados obtenidos en la expedición a Perú para la observación del eclipse de 1944. Shapley le agradeció no sólo a Gallo sino al gobierno mexicano por la buena colaboración interamericana en la expedición. La Universidad de Chicago se interesó mucho por los espectrogramas presentados por Gallo en la inauguración del Observatorio de Tonantzintla.

Luis Enrique Erro, por otra parte, estableció una buena amistad con Shapley, quien presentó a Erro y al físico mexicano Carlos Graef a sus colegas de Harvard. Erro se quedó un año en Harvard colaborando con Shapley y sus colegas, mientras coincidían en la importancia de tener un observatorio en una región situada aproximadamente en los 20 grados de latitud. ¡La latitud de Tonantzintla es de 19 grados!

Se empezó a gestar la importancia de la colaboración binacional en el campo de la astronomía.

La segunda guerra mundial puso a México y a Estados Unidos en situaciones cambiantes. La expropiación petrolera y otras reformas Cardenistas tensaron las relaciones. Sin embargo, la colaboración entre astrónomos de ambos países se incrementó, pues los observatorios estadounidenses disminuyeron su ritmo de trabajo a consecuencia de la guerra, pero hallaron en México la posibilidad de seguir trabajando con los observatorios y astrónomos mexicanos.

En 1943, en plena segunda guerra mundial, a solicitud de Graef y Erro, Haro fue recibido en Harvard como observador y por primera vez Harvard pagaría parte de su sueldo. Haro demostró ser un excelente observador con enorme capacidad de trabajo. En un observatorio de primer nivel mundial como el de Harvard, poco tardó en descubrir una peculiar estrella variable roja, lo que sorprendió a todo el equipo. Al regresar a México convertido en un experto, usó la cámara de Schmidt para hacer más y más descubrimientos, y desarrolló una peculiar técnica para obtener el máximo de información estelar de cada placa. Entonces, astrónomos del observatorio de Monte Palomar lo invitan a observar en el entonces telescopio más grande del mundo, con el fin de que sea Haro, esta vez, quien enseñe a los astrónomos de Palomar a utilizar su novedosa y peculiar técnica de observación.

Muchos más astrónomos mexicanos entraron al concierto de la colaboración internacional y en particular con los Estados Unidos, y muchos más se prepararon y graduaron en universidades de Estados Unidos gracias a la influencia de Haro.

La relación de colaboración entre estos dos países vecinos se hizo cada vez más frecuente. Cada vez más científicos de ambos países colaboraron en proyectos conjuntos, esto sentó las bases de lo que hoy es la colaboración científica más importante de ambas naciones: el proyecto de desarrollo, diseño, construcción, instrumentación, operación, financiamiento y logística del telescopio de ondas milimétricas de plato único movable más grande del mundo: el Gran Telescopio Milimétrico (GTM) y/o *Large Millimeter Telescope* (LMT).

La Universidad de Massachusetts Amherst (UMass) mantenía un programa de estudios en radio astronomía con un radio telescopio de sólo 14 metros de diámetro desde varios años atrás, para el que formaron un consorcio con cinco instituciones llamado Five College Radio Astronomy Observatory (FCRAO) para estudiar los púlsares en longitudes de ondas métricas. Durante esas observaciones descubrieron emisiones en longitudes de onda milimétricas de moléculas de monóxido de carbón en el medio interestelar, lo que los condujo, en 1976, a construir ese radiotelescopio con una antena de 14 metros de diámetro y un radomo que cubría todo el telescopio para la detección de ondas milimétricas. Este radiotelescopio se convirtió eventualmente en el mayor en su tipo en Norte América.

Preparar a las nuevas generaciones de astrónomos, ingenieros y técnicos es una meta importante tanto para UMass como para el INAOE. Las dos instituciones en cada país ofrecen grados de doctorado en esta área. Más de la mitad de los estudiantes se decantan por el estudio de la radio astronomía y hacen la mayor parte de su trabajo de investigación en esta área, por lo que buena cantidad de los recursos financieros para la investigación en radioastronomía están disponible para los estudiantes de esta peculiar disciplina tanto en UMass como en el INAOE. De la misma manera, el INAOE tenía importantes razones para invertir en el proyecto del GTM que podría proveer el desarrollo de la Infraestructura científica, técnica, además de la ingeniería y la capacidad innovadora de manufactura. Se desarrollarían más la electrónica, la óptica, la criogénica y muchas otras ramas de la ciencia y la técnica, con el beneficio para la industria nacional.

UMass había tenido desde algún tiempo colaboraciones importantes con muchos astrónomos mexicanos interesados en la misma área de investigación. Era claro para todos que el camino a seguir era la construcción del radiotelescopio de ondas milimétricas más grande y potente, pues el panorama de posibilidades científicas en el campo de las ondas milimétricas lucía muy prometedor. Para construir un telescopio que cumpliera con las especificaciones necesarias para la observación e investigación en ondas milimétricas se requería de un esfuerzo enorme que ni siquiera la Universidad de Massachusetts podría lograr sola, y además no había un sitio adecuado para la instalación de dicho telescopio en los Estados Unidos. Resulta que las ondas milimétricas se debilitan al pasar por capas grandes de atmósfera, y por lo tanto, entre más alto sobre el nivel del mar mayor será la calidad y cantidad

de radiación detectada: la idea es captar las ondas milimétricas en sitios a grandes alturas. Otro punto importante es la latitud del sitio. La de Massachusetts es del orden de 42 grados de latitud norte, por esa razón no se puede observar gran parte de la bóveda celeste del sur. Entonces, México, y en particular Puebla, con sus altas montañas y latitud de 19 grados norte representaba una posibilidad excelente para situar el nuevo radiotelescopio.

Se volvía a repetir la historia del deseo de Harlow Shapley de instalar un telescopio en la latitud de Puebla para aprovechar la ventana de observación más amplia que incluyera gran parte del cielo del sur donde se observan muchos objetos de gran interés y fuentes de radio emisión.

Mientras en México una cantidad cada vez mayor de astrónomos estaban interesados en el estudio de las emisiones de ondas milimétricas y la información que se puede obtener de ellas, aunado a la colaboración científica entre los investigadores de UMass en Massachusetts y el INAOE en Puebla, se abría la posibilidad de comenzar un proyecto conjunto entre los dos países. La tarea de construir un radiotelescopio de antena única para detección de ondas con longitudes milimétricas no sería posible para ninguna de las instituciones actuando solas. México contaba con lugares geográficos muy adecuados para la instalación, la capacidad logística, técnica científica y de recursos humanos para realizar el proyecto, mientras que UMass con la experiencia en observaciones milimétricas, recursos técnicos, científicos y humanos y posibilidades de diseño y fabricación de los detectores especiales para convertir la radiación milimétrica captada en datos útiles y fuertes para la investigación.

Aparece entonces una posibilidad real de llegar a realizar conjuntamente semejante y grandioso proyecto. Un proyecto que en su momento, el propio rector de la Universidad de Massachusetts, Dr. John V. Lombardi, aún con la mejor disposición de apoyarlo, llegó a llamar “quijotesco e improbable”, pero que con el entusiasmo y voluntad de todos llegó a convertirse en exitosa realidad.

CAPÍTULO II

¿POR QUÉ UN RADIOTELESCOPIO?

La luz que nos trae la información de todo el universo desde lo más lejano o de lo cercano y la información cotidiana recibida a través de nuestro sentido de la vista es sólo una pequeña porción del espectro electromagnético de la radiación. Como es de esperarse, en el resto de la radiación no visible para el ojo humano existe otra gran cantidad de información para nosotros. Sin embargo, esto no quiere decir que no podamos obtener esa valiosa información de otra manera. Ya la cámara infrarroja demostró ser capaz de detectar información de la radiación invisible en la región más allá del rojo, que forma parte de la región no visible del espectro. En realidad la parte visible del espectro es muy pequeña comparada con todas las frecuencias que lo integran, por eso, la astronomía demanda a la tecnología instrumentos y técnicas que le permitan observar en diferentes partes del espectro no visible.

Una afortunada decisión fue el interés por desarrollar instrumentos que permitieran “ver” lo invisible del espectro electromagnético. La parte visible del espectro sólo abarca desde el

rojo hasta el violeta, que corresponde a ondas con longitudes de onda desde los 400 a los 700 nanómetros. La longitud de onda se designa con la letra griega Lambda (λ), y sus correspondientes a frecuencias desde 4 Terahertz (THz) o 4 billones (4×10^{12}) ciclos por segundo para a luz roja, y 8 THz para la luz violeta, con la letra f. Entre este rango de 4 a 8 THz están todos los colores que conforman el arco iris y que son visibles al ojo humano.

La radiación infrarroja, a su vez, se divide en tres secciones que se llaman infrarrojo cercano, infrarrojo intermedio e infrarrojo lejano. La longitud de onda λ de esta radiación va desde los 780 nanómetros hasta un milímetro, y resulta que toda molécula que tenga una temperatura mayor al cero absoluto, es decir, superior a los cero grados Kelvin o -273.3 grados Celsius, emite radiación infrarroja. La cantidad de radiación emitida por esa molécula está directamente relacionada con su temperatura, por lo tanto, el poder observar el universo en estas longitudes de onda corresponde a poder observar ¡Todas y cada una de las moléculas del universo que tengan temperatura superior al cero absoluto! Esto es sorprendente, pero sugiere y obliga a la necesidad de inventar sistemas, dispositivos, instrumentos, detectores, y sobre todo telescopios y toda clase de artilugios que nos permitan observar estas maravillas, hasta ahora invisibles, pero llenas de información muy útil.

Las llamadas microondas son las radiaciones comprendidas entre las longitudes de onda desde los 30 centímetros hasta un milímetro. Esta radiación no sólo se usa para la comunicación y transmisión de datos, sino que también se encuentra en el universo como huella digital de acontecimientos pasados. Por ejemplo, cuando el universo comenzó a enfriarse y a convertir la energía en materia ese proceso

Figura 1. Espectro de la radiación electromagnética donde se aprecia la pequeña franja visible al ojo humano.



dejó una huella en forma de una radiación en una longitud de onda en el rango de los milímetros. Obtener información de estas longitudes de onda corresponde a asomarse a ver el origen mismo del universo.

Las ondas de radio detectadas por Heinrich Hertz en 1887 tienen longitudes de onda del orden de metros, su rango de frecuencias se extiende desde unos pocos Hertz o ciclos por segundo hasta los megaHertz o millones de ciclos por segundo. Por otra parte, los Rayos X descubiertos por Konrad Roentgen en 1895 tienen longitud de onda menor a 10 nanómetros, y fueron bautizados así porque no se sabía nada de ellas y están completamente en otra parte del espectro electromagnético.

Al otro lado del espectro están las longitudes de onda más pequeñas comenzando con la luz ultravioleta que se propaga con longitudes de onda del orden de 10 a 400 nanómetros, o sea, con ondas más cortas que la luz visible. Sólo algunos seres vivos como las abejas son capaces de ver en el ultravioleta. Sin embargo, el hombre también ha construido dispositivos que le permiten detectar la luz de estas frecuencias. Finalmente, al extremo del espectro están los rayos Gamma cuyas longitudes de onda son de las más pequeñas entre 10 y 0.01 nanómetros. Sin embargo, son las ondas más energéticas del espectro. La relación entre la longitud de onda y la frecuencia de cada onda está determinada por la velocidad de la luz, ya que la luz es intrínsecamente una onda electromagnética, y todas las radiaciones se propagan a la velocidad de la luz. Esta velocidad de la luz es conocida como “c” y es equivalente a aproximadamente 300 mil kilómetros por segundo. Entonces, cualquier onda electromagnética que oscile a una frecuencia dada tendrá una longitud de onda que corresponde a la velocidad de la luz c dividida entre la frecuencia en ciclos por segundo. Lo que se escribe como: $\lambda = c/f$, o si se quiere también como $\lambda = c/v$.

Por otra parte, la energía de las ondas electromagnéticas está relacionada con la longitud de onda, siendo las ondas con menor longitud las que tienen más energía, mientras que las ondas de mayor longitud de onda tienen menos energía. Esto se puede expresar también en términos de frecuencia como lo hizo Maxwell, quien determinó que la energía E de una onda era proporcional a su frecuencia simbolizada por la letra griega “Nu” (ν) multiplicada por la constante de Maxwell h. Entonces la energía en términos de la frecuencia se expresa como: $E = h\nu$. Que en otras palabras corresponde a decir que la luz de todo el espectro desde las ondas

de radio hasta los rayos gamma tiene una energía proporcional a la frecuencia, y por lo tanto, entre mayor sea la frecuencia mayor será su energía, por eso la luz ultravioleta del Sol nos quema la piel en la playa, pero también en las montañas muy altas donde la atmósfera es más tenue y no puede detener la radiación ultravioleta. La luz infrarroja, por otra parte, nos da calor y los rayos X tienen tanta energía que pueden atravesar nuestro cuerpo, pero no atraviesan tan fácilmente los huesos por lo que se obtienen imágenes en las radiografías. Entre más energética sea la luz más materiales puede atravesar, entonces los rayos X y los rayos gamma prácticamente lo atraviesan todo. Ya sabemos que los telescopios funcionan reflejando la luz en espejos, desviándola con lentes y concentrándola en focos, por lo que parece que un telescopio de rayos X o rayos gamma puede ser imposible ya que la luz atravesaría los espejos y lentes en lugar de ser reflejada o desviada por los mismos. Aunque el ingenio humano nos tiene reservada una sorpresa para abatir estos problemas.

La gran extensión del espectro electromagnético, o si se quiere ver de otra manera, la gran variedad de colores de la propia luz nos lleva a preguntar: ¿Qué maravillas pueden ser observadas en los rangos del espectro invisibles para el ojo humano? El primer indicio de respuesta a esta pregunta fue encontrado por casualidad por el Ingeniero estadounidense Karl G. Jansky de los laboratorios Bell en 1932 cuando trataba de encontrar la causa del ruido que producía interferencias en las comunicaciones, y encontró que una señal de este tipo provenía de algún lugar, pero cambiaba de posición aparente completando un ciclo casi cada veinticuatro horas, tal y como lo hacen el Sol y las estrellas en el cielo. Jansky no tenía conocimientos de astronomía, pero pudo deducir que la fuente de este ruido, al que él llamó “estática”, provenía del espacio ya que procedía de una fuente emisora que parecía recorrer la bóveda celeste cada día tal como lo hacen el Sol, la Luna y las estrellas, que debido al movimiento de rotación y traslación de la tierra parecen completar un ciclo cada día de casi veinticuatro horas. Esto es porque la Tierra no sólo rota, sino que también se traslada alrededor del Sol, y en un día ya se trasladó lo correspondiente a un 365^{avo} de su órbita de manera que cuando termina de dar una vuelta sobre su eje ya no encuentra a la misma estrella exactamente en el mismo lugar. Jansky pronto investigó que la señal llamada estática procedía del centro de la galaxia, y por lo tanto, parecía salir y ponerse tal como el Sol y las estrellas. Esto marcó el principio de la investigación en radioastronomía.

CAPÍTULO III

EL ASUNTO ECONÓMICO

En este tipo de proyectos probablemente el mayor escollo es la obtención de los recursos económicos para realizarlos, y más aún cuando se trata de un proyecto financiado por dos países, con tan diferentes posibilidades económicas y regulaciones diversas. La obtención de recursos es entonces una labor sumamente complicada. México, a pesar de ser un país en desarrollo, ha dedicado recursos a la ciencia dentro de sus reducidas posibilidades, mientras que los Estados Unidos han sido capaces de financiar hasta viajes a la Luna. Entonces era cuestión de tocar las puertas correctas para convencer a las personas indicadas para financiar el gran proyecto del Gran Telescopio Milimétrico. El gobierno de México cuenta con el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, que en su tiempo fue formado por Guillermo Haro, como el organismo encargado de financiar los proyectos científicos del país a nivel nacional, y cuenta con el apoyo de los consejos estatales como el Consejo de Ciencia y Tecnología del estado de Puebla. Mientras que por parte de Estados Unidos existe principalmente la National Science Foundation y varias otras instituciones que financian

los proyectos científicos de su nación, pero también cuentan con el apoyo de fundaciones tanto públicas como privadas interesadas en apoyar el desarrollo científico y tecnológico.

El memorando de entendimiento para el diseño, construcción, instalación, operación y mantenimiento del Gran Telescopio Milimétrico fue firmado el 17 de noviembre de 1994 por el Director General del INAOE, el Dr. Alfonso Serrano y el Vicepresidente Ejecutivo de la UMASS, el Dr. Allen Sessoms. Firmaron como testigos por parte de Estados Unidos el Vicegobernador de Massachusetts Argeo Paul Cellucci; el Congresista J. Joseph Moakley y el Presidente de la UMASS, Michael K. Hooker. Por parte de México firmó el director general del CONACYT, el Dr. Fausto Alzati Araiza; el Director General de Cooperación Científica de la Secretaría de Relaciones Exteriores, Embajador Francisco Cruz González; y el Director de Investigación Científica del CONACYT, el Dr. Miguel José Yacamán. En el memorando se estimaba el costo del proyecto en 46.4 millones de dólares y que el INAOE y UMASS aportarían aproximadamente partes iguales, es decir, se esperaba que el INAOE fuera capaz de conseguir 79.1 millones de “nuevos pesos” (a 3.41 nuevos pesos por dólar) de alguna partida especial del gobierno federal o estatal, cuando el presupuesto de todo el instituto para ese año había sido de 61.6 millones. Hay que recordar que apenas un año antes, en 1993, se habían removido tres ceros a la moneda y había entrado en circulación el “nuevo peso” como estrategia para dominar la inflación. Un año después fue todavía más complicado pues entró en vigor el Tratado de Libre Comercio que prometía ser el inicio de una bonanza económica a base de incrementar el comercio con EEUU y Canadá, pero en contraste a esa visión, en enero hizo su aparición el Ejército Zapatista de Liberación Nacional en los Altos de Chiapas, que significó un alboroto en la vida política del país que hizo crisis con el asesinato de Donaldo Colosio candidato del PRI a la presidencia de la república en marzo y el reclamo generalizado de fraude en las elecciones generales de agosto que finalizó con la toma de posesión de Ernesto Zedillo como Presidente de México en diciembre.

Para completar el complejo panorama nacional, a una semana de iniciada la presidencia de Ernesto Zedillo, el dólar subió a seis pesos derivado del llamado “error de diciembre”. Con apenas un mes de vida el proyecto ya había duplicado su costo estimado a 158 millones de nuevos pesos. Para 1995 la situación de la economía

empeoró al grado que el PIB tuvo un decrecimiento del 6 %, se perdieron un millón de empleos en lo que se conoció como el “efecto tequila” y, en general, como la peor crisis económica de la historia reciente. Estamos hablando de la época en que los bancos se quedaban sin liquidez y el gobierno adquirió sus deudas con el fobaproa y, aún así 14 de los 18 bancos que operaban en el país, desaparecieron.

Pues en medio de este caos político y económico, un grupo de científicos se comprometía a construir, con un presupuesto estimado que no tenía precedente en la historia, en un campo de la ingeniería en la que no había mucha experiencia, el instrumento de observación de ondas milimétricas más grande del mundo en su tipo, cuyos requerimientos técnicos de precisión se encontraban en los límites de lo físicamente posible.

Las buenas y las malas

Las buenas noticias para el proyecto eran precisamente que Ernesto Zedillo había ganado las elecciones. Antes de la firma del convenio, ya se habían llevado a cabo varias reuniones entre los investigadores de la Universidad de Massachusetts (UMass) y del INAOE en las que discutían la necesidad de contar con un radiotelescopio de grandes dimensiones. A finales de los ochentas se consideraba que el radiotelescopio de 14 metros que la UMass había operado desde 1976 en el Five College Radio Astronomy Observatory empezaría a perder relevancia en un futuro cercano, aunque el telescopio había contribuido al descubrimiento del sistema pulsar binario que les mereció el Premio Nobel de física a Joseph Taylor y Russell Hulse en 1993. Los radiotelescopios de antena parabólica más grandes en ese tiempo eran el Parkes (Australia) de 64 metros, el Green Bank (EEUU) y el Effelsberg (Alemania) ambos de 100 metros, para captar ondas de 3 mm. En el rango por debajo de 3 mm estaban el IRAM de Pico Veleta (España) de 30 metros y el Nobeyama (Japón) de 45 metros, por lo que si el consenso era construir otro radiotelescopio que fuera competencia, este debía ser más grande que Nobeyama o IRAM pero con una superficie más precisa que Parkes, Effelsberg y Green Bank, estar más cerca del ecuador, contar con cielo más transparente a la radiación milimétrica y captar ondas de 1 mm.

En opinión de las compañías que habían participado en la construcción del 14 metros, un radio telescopio para ondas de 1 milímetro y de 50 metros de diámetro era una meta muy ambiciosa pero técnicamente alcanzable si se dedicaban suficientes recursos a la solución de varias incógnitas técnicas que en esos momentos no tenían una solución probada. Mientras más grande es una pieza más propensa es a los errores de fabricación y a las deformaciones debidas a su propio peso. Para construir un reflector aceptable se debe cumplir con la regla “ $\lambda/20$ ”, esto es, que la superficie fabricada debe tener imperfecciones que no sean mayores a la vigésima parte de la longitud de onda (λ) con respecto a la superficie definida por la ecuación matemática. Como el GTM se concibió para observar radiación de longitud de onda de 1 mm ¡entonces el error de fabricación de la superficie reflectora debe ser menor a 50 micras en promedio! Por tanto, la opción alternativa a construir un radiotelescopio de gran tamaño es construir un conjunto de radiotelescopios de menor tamaño en los que la precisión de la superficie es “más fácil” de obtener. Por si había duda que la decisión de construir un sólo telescopio de gran tamaño había sido la decisión adecuada, financieramente hablando, el proyecto ALMA consistente en 64 antenas de 12 metros de diámetro, igualmente pensado para observar longitudes de onda de 1 mm, se formalizaría en 1999 con un presupuesto estimado de más de 500 millones de dólares.

En 1992 se presentó la propuesta de construcción del GTM al gobierno Mexicano, específicamente al titular de la Secretaría de Educación Pública, pero no se llegó a formalizar porque, a pesar de tener la aprobación de su titular, Ernesto Zedillo Ponce de León, el CONACYT tuvo una opinión desfavorable y no fue sino hasta 1994 que decidió comprometer los primeros recursos para que se realizara un estudio de los sitios en donde se podría construir el telescopio y firmar el convenio de colaboración en noviembre. Algo pudo influir el hecho de que CONACYT en aquel tiempo dependía presupuestalmente de la SEP y que quien siendo su titular aprobó el proyecto acababa de ser electo Presidente de la República.

La mala noticia es que en el convenio de colaboración no se comprometieron los recursos financieros, sólo se estableció el compromiso de solicitarlos a todas las fuentes disponibles. La buena noticia es que se lograron comprometer de manera inicial el equivalente en pesos a 10 millones de dólares del Programa de Apoyo a la Ciencia en México. La mala es que a semanas de firmado el convenio ya se había

devaluado el peso a la mitad respecto al dólar. UMass, después de un pleito legal con la compañía que ayudó a hacer las primeras estimaciones, contrató a la compañía constructora del telescopio Keck y de varias antenas para la NASA para producir el diseño conceptual y preliminar del GTM. La mala noticia es que, cuando se evaluó el diseño preliminar, en 1997, la estimación presupuestal era de más de 100 millones de dólares. El tipo de cambio promedio ese año era ya de 8 pesos por dólar; 800 millones de pesos representaban 10 veces el presupuesto anual del INAOE.

Indudablemente es un gran mérito haber conseguido el apoyo financiero del gobierno Mexicano para un proyecto científico, desafortunadamente la designación de los recursos se dio de manera irregular, con retrasos, con reducciones, con condiciones y reglas de operación desalineadas con los objetivos del proyecto, lo que, a su vez produjo retrasos en la construcción y encarecimiento. Encima, el proyecto debió lidiar contra numerosas voces críticas que aseguraban que la construcción de este gran telescopio no sería posible, que nunca funcionaría. Algunas voces tenían razones fundadas para dudar de su factibilidad, pues nunca se había construido una estructura similar en el mundo, pero otras se basaban solamente en percepciones preconcebidas tal vez animadas por la situación económica y política donde parecía que nada nos salía bien como país.

CAPÍTULO IV

IMPACTO SOCIAL

Siempre que se quiere construir una cosa que no ha sido construida nunca antes el nivel de incertidumbre es muy alto y es necesario considerar que las estimaciones presupuestales fácilmente se verán rebasadas conforme se avanza en el desarrollo del proyecto. Para la entidad financiera debe quedar muy claro que mientras más complejos o avanzados sean los proyectos científicos planteados, más alta es la incertidumbre y la probabilidad de no llegar al objetivo planteado.

La entidad financiera también debe entender que en un proyecto científico conseguir un resultado diferente al objetivo inicialmente planteado es un resultado válido. Inclusive, llegar a la conclusión de que el objetivo era inalcanzable también es un resultado altamente apreciado. Es una de las razones por las cuales la mayoría de los proyectos científicos de avanzada en el mundo son financiados por los gobiernos y no por las empresas, sobre todo cuando los proyectos no persiguen resultados que puedan ser traducidos en productos comerciales, sino que se plantearon para avanzar el conocimiento universal en un área particular de la ciencia.

La exploración del universo, en particular, ha dado lugar a proyectos científicos de resultados espectaculares y ha dado aplicación pacífica a tecnologías que originalmente se crearon para fines bélicos, baste mencionar a los radares, las computadoras y los cohetes de gran alcance. Tal vez alguien, con una visión puramente comercial-capitalista, podría concluir que la famosa fotografía de la tierra vista desde la Luna (A S08-14-2383 o “Earthrise”), obtenida por la tripulación del Apollo VIII representa, a pesar de su espectacularidad, un dispendio irracional, un gasto inútil. Para reforzar el argumento, se puede apuntar que el programa Apollo, que llevó a los primeros seres humanos a la Luna, se desarrolló en medio de un período de turbulencia social en Estados Unidos. Marcada por el movimiento por los derechos civiles, la fallida invasión a Cuba, la crisis de los misiles, la guerra de Vietnam, el asesinato de John F. Kennedy y una recesión económica iniciada en 1960. El contra argumento, por supuesto, es que para combatir la recesión, Kennedy propuso dirigir el gasto público en defensa, educación y en investigación y desarrollo tecnológico. Tan sólo en el programa Apollo (1961 a 1975) se invirtieron 25 400 millones de dólares.

Un año antes de la llegada a la Luna, el número de empresas que trabajaban en la NASA llegó a 28 500. Se estima que alrededor de 400 000 ingenieros, científicos y técnicos trabajaron en el programa Apollo. Como punto de comparación, esa cantidad equivale a cuatro estadios Azteca llenos. Algunas de las empresas que participaron en el desarrollo de tecnologías específicas para la misión Apollo más tarde aprovecharon las experiencias ganadas en sus propios desarrollos comerciales que hasta la fecha las mantienen en la frontera de la técnica. Como ejemplos, se pueden mencionar a Boeing, McDonnell Douglas, Black & Decker, Motorola, Northrop Grumman, General Motors, Honeywell y Ford. El proyecto Apollo representó la conclusión de un plan a largo plazo que inició con los proyectos Mercury y Gemini, por lo que debe quedar claro que la inversión total, las empresas creadas y consolidadas a causa de este plan, la infraestructura creada (carreteras, aeropuertos, talleres, laboratorios) y los trabajos generados son todavía mayores.

Debe reconocerse también que esos beneficios sociales no se hubieran logrado sin una visión congruente a largo plazo del gobierno patrocinador que entendía la complejidad del proyecto y la alta probabilidad de fracaso: la NASA se creó en 1958 un año después de que Estados Unidos fracasara en su intento de ser el primero en

colocar un satélite artificial en órbita. A partir de entonces, la NASA fracasó en sus misiones de poner al primer hombre en el espacio y a la primera mujer en órbita. El primer cohete Atlas con una cápsula Mercury explotó, el primer cohete Redstone se levantó sólo cuatro pulgadas del suelo y el Apollo I se incendió en la plataforma con tres astronautas a bordo. Pese a todo, el financiamiento no se detuvo y para julio de 1969, con el alunizaje del Apollo XI, la NASA se convirtió en la agencia tecnológica norteamericana más famosa del mundo y lo sigue siendo en nuestros días a pesar de que existen otros laboratorios más viejos que realizan desarrollos de aplicación más inmediata entre los 17 laboratorios del Departamento de Energía, los 27 Institutos Nacionales de Salud o los 10 centros de investigación del Departamento de Defensa, por mencionar algunos.

Con toda proporción guardada, el Gran Telescopio Milimétrico puede ser el proyecto científico Mexicano que, de manera similar al proyecto Apolo Estadunidense, se convierta en referencia y símbolo de México que por su visibilidad, por la espectacularidad de sus resultados, impulse el financiamiento de muchos más proyectos científicos, la creación de más infraestructura de investigación tecnológica como una herramienta de progreso social y económico a lo largo y ancho del país.

CAPÍTULO V

EL GRAN TELESCOPIO MILIMÉTRICO

Diseño preliminar y elección del sitio

El diseño conceptual que se presentó y fue considerado viable por el titular de la SEP se basaba en diseños de otros radiotelescopios exitosamente contruidos y planteaban algunas consideraciones que debían irse resolviendo. Básicamente se buscaba un radiotelescopio con un buen acceso y logística que contara con una antena parabólica móvil de 50 metros de diámetro capaz de apuntar a cualquier objeto de la bóveda celeste, concentrar su radiación enfocándola en el plano específico para su detección por medio de instrumentos de alta tecnología y además seguir la trayectoria aparente del objeto compensando con una gran precisión la rotación de la tierra.

Dada la enorme masa del instrumento hacerlo con movimientos basados en ejes de alta-azimut conjugados era la única alternativa viable. La antena debía tener una superficie parabólica que permitiera recolectar la mayor cantidad de fotones en las longitudes de onda de 0.8 a 3 milímetros y estar situado en un

ambiente de gran altura para coleccionar la radiación electromagnética antes de que esta tuviera que atravesar una capa demasiado grande de atmósfera, lo que la iría debilitando. Además estando a cielo abierto tendría que ser capaz de soportar ráfagas de viento de 25 metros sobre segundo y necesariamente contaría también con elevadores y grúas para personal y carga. Su movimiento tendría que ser suave y sin las mínimas variaciones para asegurar un seguimiento preciso del objeto bajo observación. Hay que tener en cuenta que una mínima variación o error en el apuntado o el seguimiento del telescopio proyectado a las enormes distancias del cosmos se convierte en variaciones enormemente erráticas e inútiles. Pensemos que con sólo mover un segundo de arco el ángulo del telescopio, el error obtenido será de una distancia de un poco más de tres años luz para la distancia que separa a la Tierra del Sol, así que a distancias mucho mayores como a las que están las galaxias, y más allá, un error de sólo un segundo de arco es verdaderamente inmenso. Esto quiere decir que el telescopio debe moverse al perfecto compás de la sinfonía cósmica del universo. Estas son sólo algunas de las condiciones en el plano técnico funcional y científico pero no son todas, muchas otras tenían que ser tomadas en cuenta para el diseño, tales como la resistencia y rigidez, las deformaciones térmicas, las cargas de viento, los controles computacionales y la conservación de la forma parabólica de la superficie. En cuanto a la superficie reflectora de la antena, esta debía ser una parábola de revolución con una distancia focal fija y además tener un segundo espejo llamado el espejo secundario que serviría para regresar el haz de luz al interior del edificio donde se formaría la imagen. Una antena de estas características sustenta un área de 2 000 metros cuadrados y no se puede fabricar de una sola pieza, es necesario dividirla en segmentos perfectamente ajustados y controlados por computadora para mantener la forma parabólica ideal frente a las deformaciones causadas por los cambios térmicos, la fuerza de gravedad ejercida en cada punto de la antena de acuerdo a su posición en cada fase del apuntado y guiado y la carga de vientos soportada en cada momento. Se realizó entonces el diseño preliminar en la empresa constructora de la estructura del telescopio Keck cuya particularidad principal es que es el telescopio óptico más grande del mundo y que su espejo primario no está hecho de una sola pieza sino de varios segmentos perfectamente acoplados, como si fueran uno sólo, mediante un sistema automático de corrección de posición de cada uno de sus segmentos. Esta compañía planteó tres posibles estructuras para la antena: “yoke and post”, alidada en ruedas y alidada en pista de aceite. La primera estructura sujeta la antena principal en una horqueta de

acero y la horqueta se sostiene a un poste de concreto por medio de un balero que le permite el giro alrededor del eje de acimut. La segunda estructura es más rígida pues plantea una estructura tubular tipo piramidal cuya base se apoya en varias ruedas de acero que giran sobre una pista de acero, la antena se acopla a la alidada por medio de dos baleros que le dan el giro alrededor del eje de elevación. La tercera estructura era idéntica pero sustituye las ruedas y la pista de acero por una ingeniosa pista de aceite que evitaba la fricción estática y permitía movimientos extremadamente suaves sin perturbaciones. El objetivo del contrato con esta empresa era desarrollar los dibujos de construcción y simular con los datos más cercanos a la realidad un modelo en computadora que ayudara a determinar si alguno de esas estructuras era capaz de desempeñar el apuntado y seguimiento de cuerpos celestes con la exactitud requerida aún bajo condiciones atmosféricas adversas, principalmente de viento.

Por algún tiempo se llegó a considerar la construcción de una estructura que aislara al telescopio de los efectos del viento, tal y como el telescopio de 14 metros de diámetro del Five College Radio Astronomy Observatory (FCRAO) en Massachusetts. Haciendo un juego de palabras con las letras GTM, una broma común era referirse al telescopio como “Gran Tamal de Mole”, y decir que se planeaba encerrar al gran tamal en una gran tamalera. Se revisaron al menos dos diseños, un domo fijo de material transparente a las ondas milimétricas y otro domo móvil con una cortina deslizante, pero se llegó a la conclusión de que la estructura para encerrar un telescopio de 55 metros de altura sería más cara que el mismo telescopio. Así que se optó por un telescopio a cielo abierto. Lo que conllevaba una revisión exhaustiva de todos los detalles de diseño y construcción para un instrumento que se vería expuesto a las condiciones de un cielo abierto, tales como las lluvias, nevadas, granizadas, vientos, caída de rayos y hasta regulaciones de tráfico aéreo.

El mismo año que se inició el diseño preliminar, se comenzó con la búsqueda del sitio adecuado para instalar el radiotelescopio. La radiación electromagnética emitida por diferentes cuerpos celestes es absorbida, reflejada o traspasada en nuestra atmósfera dependiendo la longitud de onda de esta radiación. En el caso del GTM, la intención es detectar radiación en el rango de 100 GHz a 300 GHz, que equivale a ondas con una longitud de 3 mm a 1 mm, es decir, una longitud de onda muy grande en comparación con la longitud de onda de la radiación visible, que se ubica entre 380 nanómetros (violeta) y 780 nanómetros (rojo). Por lo tanto, se buscaron

las condiciones atmosféricas con la mayor transparencia a esas longitudes de onda. Es sabido que una de las principales características que hace a la atmósfera más o menos transparente en el rango de 100 a 300 GHz es la concentración de vapor de agua, mientras menor es la concentración de vapor mayor es la transparencia, lo que corresponde a lugares desérticos o a gran altura respecto al nivel del mar o ambos.

Estaba claro que la cercanía de la montañas más altas de México están, por fortuna, en el altiplano azteca y en particular en el estado de Puebla que cuenta con el volcán activo más alto del país, el Popocatepetl (cerro que humea en Náhuatl) conocido popularmente simplemente como el “Popo”, a cuarenta y tres kilómetros de la ciudad de Puebla con 5 400 metros sobre el nivel del mar. Muy cerca del “Popo” está el Iztaccíhuatl (Mujer blanca en lengua Náhuatl) conocido popularmente como el “Izta” o la mujer dormida, por su forma semejante a una doncella recostada. Su altura es de 5 215 metros sobre el nivel del mar y es un volcán semiactivo que parte de los límites del estado de Puebla. Un volcán más importante por ser el más alto del país es el Citlaltépetl, (Montaña de la estrella en Lengua Náhuatl) conocido también como el Pico de Orizaba, por su cercanía a esta ciudad veracruzana, aunque en realidad está situado en gran parte en el estado de Puebla. Su altura es extrema y llega a los 5 747 metros sobre el nivel del mar. Es un volcán inactivo o al menos muy poco activo que presenta eventuales tremores. En cuanto a la siguiente montaña más conocida de la región está Malintzin o Matlalcueye, nombrada por la mujer que sirvió de traductora a Hernán Cortés durante la conquista española con una altura de 4 420 metros sobre el nivel del mar, entre los estados de Tlaxcala y Puebla, hoy conocida simplemente como “La Malinche” y es en realidad el volcán más cercano al las instalaciones del INAOE en Tonantzintla, con muy poca actividad. La siguiente montaña en la lista de sitios altos para instalar un radio telescopio es el Tliltépetl (Montaña Negra o montaña de la Agüita, según diversas traducciones), aunque los pueblos cercanos le llaman Sierra Negra o Atlitzin, vocablo que tiene que ver más con agua pequeña. El nombre oficial que le ha dado el Instituto Nacional de Estadística y Geografía es “Cerro de la Negra”. Está muy cerca del Pico de Orizaba, a tan sólo siete kilómetros en línea recta, y por la majestuosidad del Pico frecuentemente pasa inadvertida, ya que el pico se destaca por estar la mayor parte del tiempo nevado. Sin embargo, “La Negra”, como se conoce coloquialmente, con una altura de 4 600 metros sobre el nivel del mar, resulta ser la cuarta montaña más alta del país,

y está situada en el Estado de Puebla a cerca de 200 km del INAOE y a pocos kilómetros de Ciudad Serdán.

Otras montañas Mexicanas fueron consideradas para instalar el GTM entre las que destacan el Nevado de Toluca en estado de México con una altura mayor de los 4 500 metros, pero que se ha convertido ya en una atracción turística ya que en su cima hay un hermoso lago que atrae a muchos visitantes y excursionistas, y el Cofre de Perote, con 4 282 metros de altura, pero con muy poca comunicación.

Se prospectaron varias de estas montañas y otras más para la instalación del GTM. El primer paso consistía en colocar en sus cimas unos radiómetros, instrumentos encargados de medir la cantidad de radiación electromagnética recibida en el lugar, y además estaciones meteorológicas que proporcionaran información sobre la cantidad de noches despejadas, la precipitación de lluvia, nieve y granizo, la humedad relativa y las velocidades y predominancias de los vientos en los respectivos sitios estudiados. No fue fácil recabar los datos. Se adquirieron equipos de monitoreo, pero había poca o nula experiencia dentro del INAOE para el manejo e interpretación de la información. Los primeros alumnos que se incorporaron al proyecto empezaron a capacitarse en el manejo de sistemas de información geográfica (GIS) y fueron quienes “abrieron brecha” para instalar las estaciones remotas en las cimas de las montañas, recorriendo los caminos escarpados en parte a pie con los equipos al hombro. Otro aspecto muy importante en la elección de un sitio para observaciones en radioastronomía es la necesidad de silencio electromagnético. Esto es semejante a la necesidad de tener oscuridad en un observatorio astronómico tradicional donde se observa la luz de las estrellas en su rango de luz visible, ya que se requiere un sitio oscuro para que las luces artificiales de las ciudades no interfieran con la luz proveniente de los objetos celestes que se quieren estudiar. En el caso de un radiotelescopio, se necesita un sitio donde las comunicaciones de radio de la humanidad sean lo menos frecuentes, y a eso es a lo que llamamos silencio electromagnético. En un radio telescopio no se pueden usar radios de intercomunicación ni teléfonos celulares, ya que el radio telescopio está diseñado para captar señales electromagnéticas muy, muy débiles provenientes de las enormes distancias del cosmos, y cualquier señal de radio emitida en la cercanía del telescopio será captada como ruido que deteriora las observaciones de la misma manera que la luz de las ciudades deteriora las observaciones con un telescopio óptico. Hasta los vehículos

con motores a gasolina producen arcos eléctricos en sus bujías de encendido, provocan emisiones y ruido electromagnético bastante grande para sensibilidad del radiotelescopio, y es por eso que se deben usar solamente vehículos a diesel en los radio observatorios. Otro punto importante es el tráfico aéreo, ya que la presencia de rutas aéreas cercanas al observatorio de gran altura, además de ser un obstáculo natural para la navegación, están en el rango de las comunicaciones de radio de los aviones con los centros de control aéreo, todos estos temas deben ser regulados y tomados en cuenta cuando se tiene que escoger un sitio lo más adecuado para ubicar un radiotelescopio.

Los estudios realizados con las prospecciones, aunados a las consideraciones logísticas de cada montaña, dieron como resultado el hecho que entre los finalistas para la instalación del gran radiotelescopio quedaron las montañas de La Malinche y La Sierra Negra.

Durante los estudios realizados con los instrumentos colocados en ambas montañas se pudo notar la reticencia de los pobladores de las cercanías de La Malinche a la instalación del equipo científico en lo que ellos llamaban “su montaña”, proveedora de agua y lluvia, por lo que se retiraron las estaciones meteorológicas y los radiómetros de La Malinche con la esperanza de lograr un consenso de aceptación por parte de los pobladores. La Malinche parecía un lugar ideal por su cercanía al INAOE, con buenas comunicaciones y caminos de acceso tanto desde el estado de Puebla como desde el estado de Tlaxcala, incluso en las faldas de la montaña funciona un centro recreativo y otro más de entrenamiento de alta montaña para atletas de alto rendimiento como maratonistas, corredores de fondo y nadadores de distancias largas. Lamentablemente no se lograron acuerdos con las comunidades para instalar ahí el telescopio.

Por su parte, en la zona aledaña a “La Negra” se logró mucha más aceptación. Aunque está más lejos de las instalaciones del INAOE, tiene cercanía a la población de Ciudad Serdán con infraestructura suficiente para ayudar a las necesidades del futuro observatorio, como comercios, hoteles, bancos, mercados, etc., además está cercanamente conectada a la autopista que conecta Puebla con Veracruz que es el puerto marítimo más grande de México. Por otra parte, existía ya un camino hacia el Pico de Orizaba usado por los alpinistas de todo el mundo, que llegaba hasta el

primer refugio para la conquista de la cima del colosal Pico de Orizaba. El camino partía desde Ciudad Serdán y aunque era bastante rústico permitía el acceso al menos a una parte cercana a las montañas del Pico de Orizaba y Sierra Negra, desde donde los alpinistas iniciaban el ascenso a las cimas.

Entonces se enfocaron los esfuerzos en estudiar más a fondo las condiciones en la Sierra Negra y buscar una mejor logística para acceder a la cima de la montaña. Las pequeñas poblaciones de Atzitzintla y Texmalaquilla son las más cercanas a la cima de la montaña. Su acceso más viable no es por el camino de los alpinistas que salen de Ciudad Serdán, sino por el camino que va desde la autopista a Orizaba hacia Ciudad Serdán. A pocos metros de abandonar la autopista hay un camino rural que lleva a Atzitzintla desde donde se puede observar ya claramente la grandeza del Pico de Orizaba y el volcán extinto Sierra Negra. En el camino también se pueden ver los remanentes de varias edificaciones prehispánicas en forma de pequeñas pirámides que tenían la función de ofertorios. Pasando Atzitzintla, existía un camino de terracería para llegar a la siguiente población aún más pequeña llamada Texmalaquilla, que es el último poblado antes de comenzar las faldas de los volcanes Pico de Orizaba y Sierra Negra. Este camino fue asfaltado por el gobierno de Puebla cuando se decidió instalar el GTM en la Sierra Negra y eventualmente se construyó un puente para cruzar un arroyo que al desbordarse en época de deshielo y lluvias hacía casi imposible el acceso a Atzitzintla. Este fue uno de los primeros beneficios que el GTM trajo a la comunidad cercana. En el principio tanto Texmalaquilla como Atzitzintla estaban prácticamente aisladas a tal grado que existía solamente un teléfono y a través de altoparlantes llamaban a la persona que debía recibir la llamada. Ya desde Texmalaquilla en adelante sólo había brechas que usaban tanto los alpinistas para llegar al refugio alpino del Pico de Orizaba como los pastores locales para llevar a pastar sus rebaños de borregos a las tierras más altas. En cierto punto más alto la brecha se bifurca en dirección a la Sierra Negra, ya que también era un objetivo para los alpinistas, y también un centro ceremonial muy antiguo, donde se rendía culto al agua y posteriormente a los símbolos católicos locales.

Los estudios de captura de radiación y condiciones climatológicas continuaron dejando cada vez más en claro los beneficios que la Sierra Negra ofrecía para la instalación del radiotelescopio. La comunidad científica tanto del INAOE como de UMass se decantaron por la instalación en la Sierra Negra después de haber estudiado varias

posibilidades, ya que este sitio llenaba más que ningún otro las expectativas de altura, transparencia celeste, condiciones meteorológicas y logística. Por fin en 1997 se decidió oficialmente que el GTM se construiría en la Sierra Negra.

En términos de transparencia, después de varios años de operación y monitorear constantemente las condiciones se puede confirmar que fue la mejor elección, pues ha registrado valores del 98 % durante los meses de invierno de manera consistente. En cuanto a la cercanía al ecuador, el GTM está a 19° latitud norte. En comparación con el JCMT, también está a 19° pero a 4092 msnm y mide 15 metros. El otro radiotelescopio que le sigue en tamaño al GTM es el Nobeyama de 45 metros, está a 1350 msnm a 35° latitud norte, y el telescopio IRAM de 30 metros está a 2850 msnm latitud 37° norte. Así que el GTM no es solamente el más grande sino también el que está a mayor altura sobre el nivel del mar entre los telescopios más cercanos al ecuador.

Diseño final

Una vez elegido el sitio y determinado el concepto de telescopio a cielo abierto para el GTM se procedió a realizar el diseño final que llevaría al diseño ejecutivo. Comisiones de científicos, ingenieros, arquitectos se reunieron con empresas de ingeniería, construcción y montaje de varias partes del mundo para determinar miles de detalles que se habían identificado en el diseño preliminar. Siguiendo las leyes mexicanas sobre contratos con recursos públicos, el diseño final se sometió a un proceso de licitación internacional. Quien ganó la licitación fue una empresa alemana que propuso una estructura que combinaba la estructura de alidada en ruedas y la estructura *yoke and post* y aseguraba que sería tan rígida que no tendría problemas para cumplir los requisitos de exactitud en el apuntado funcionando a cielo abierto.

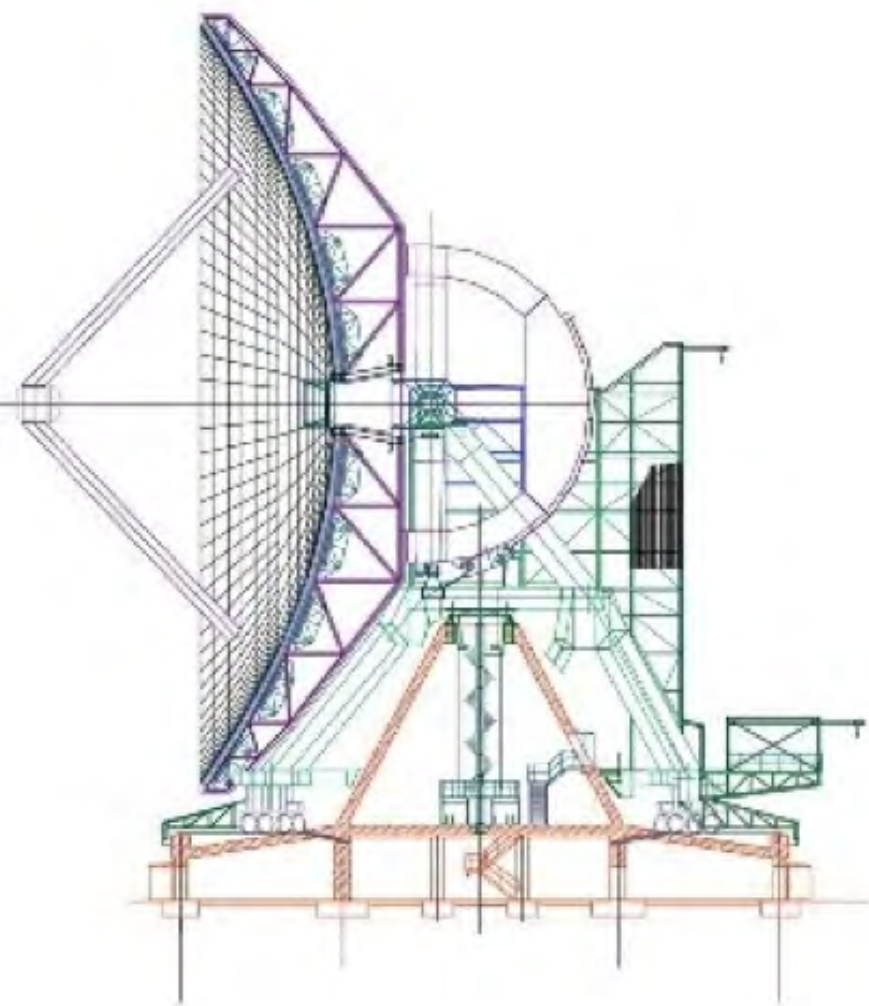
Esta compañía determinó que los segmentos que conformarían la antena deberán estar montados en marcos iso estables semirrígidos, que a su vez estarían apoyados en la estructura mecánica principal de la antena. Adicionalmente al diseño del telescopio, se iniciaban también los trabajos para diseñar, probar y producir los detectores capaces de convertir y almacenar la información obtenida por la gran antena

y su mecanismo de alto desempeño en información útil y manejable de donde se podría obtener la información y las imágenes que producirán los descubrimientos más impactantes en el área de la radioastronomía.

Ya en el aspecto logístico y de seguridad; se consideraron otras condiciones como: transporte adecuado para condiciones de nieve, hielo, granizo, lluvia y neblina. Con protección integral contra caída de rayos , soporte de emergencia en caso de falta de energía eléctrica, facilidades para albergar personal científico, técnico y de apoyo, tales como cocina y dormitorios con calefacción y enriquecimiento de oxígeno para poder respirar, suministro de agua potable y baños, sistemas de tratamiento de aguas residuales y manejo adecuado de desechos .

Fueron muchas las largas horas de trabajo y discusión para comenzar a darle forma al proyecto. Se tenía la intención de fabricar la mayor parte del telescopio en México con compañías nacionales. Sin embargo, dada la gran precisión y estabilidad de varios de los componentes estructurales, mecánicos ópticos, electrónicos y de seguridad siempre se supo que había que buscar la ayuda y sólida experiencia de empresas y personas de todo el mundo para el diseño y análisis estructural del telescopio. Más tarde las necesidades de alta tecnología y capacidad de fabricación convirtieron al ambicioso proyecto en una colaboración globalizada, ya que además de contar con la asociación con la UMass se contó con la participación de varias empresas y personal de diferentes partes del mundo. La participación globalizada de empresas y personal en el GTM no sólo ayudó técnicamente a la realización del proyecto, sino que además sirvió para difundir mundialmente su existencia y realización en el ámbito industrial, tanto como ya lo era en el ámbito científico y académico, lo que despertó aún más el Interés mundial por el GTM. Pero fueron muchas las empresas nacionales que tuvieron participación mayoritaria en la construcción, diseño, ensamble y desarrollo del GTM con la consabida transferencia tecnológica y aprendizaje por parte de todos los participantes en este gran proyecto, por lo que fue muy interesante verse involucrados en un ambiente multinacional y multicultural durante el proceso del desarrollo y realización del proyecto.

Figura 2. Esquema del GTM.



Construcción del radiotelescopio

Finalmente en 1999 empezaron a perforar pozos para alojar a los 37 pilares de anclaje a profundidades de más de 20 metros para establecer la cimentación del edificio de 40 metros de diámetro que debía soportar temblores de hasta 9 grados en la escala de Richter. Y no es que en la zona se produjeran temblores de esta magnitud, sino que el propio telescopio se tiene que mover con enorme precisión para apuntar a los objetos en el cielo, de tal manera que al realizar su propio movimiento y teniendo una masa de más de 6 000 toneladas, genera sus propios mini movimientos sísmicos, así que había que reducirlos al máximo haciendo que sus traslaciones de posicionado y seguimiento fueran lo más suaves y sutiles posibles.

Al comenzar la perforación de huecos para las pilas de cimentación se daba el primer paso en la construcción del observatorio. Los pozos para las pilas debían ser estrictamente verticales y conservar esta verticalidad durante todo el trayecto, sin importar los diferentes estratos de material encontrados durante la perforación, un asunto en el que las compañías perforadoras tienen bastante experiencia. Sin embargo, apareció el primer escollo y la primera experiencia, al darse cuenta que el rendimiento de los motores de las máquinas perforadoras a los 4 600 metros de altura de la Sierra Negra y las temperaturas entre los más 5 y menos 15 grados centígrados estaba muy por debajo del rendimiento observado a las alturas mucho menores donde siempre habían trabajado. Esto marcó uno de los principales obstáculos en el desarrollo de la construcción. Inclusive las tareas manuales más comunes como pintar, sujetar, atornillar y empalmar cables eléctricos en el exterior se vuelven extremadamente complicadas al estar expuestos a temperaturas bajo cero por largos períodos de tiempo. La Comisión Federal de Electricidad también aprendió a la mala que no era buena idea tender líneas aéreas hasta la cima, ya que los postes de alta tensión se vinieron abajo por acumulación de nieve y hielo. Los primeros avances de la obra civil se llevaron a cabo con energía eléctrica de generadores a diesel. No sólo las máquinas de todo tipo bajan su rendimiento a grandes alturas, también los seres humanos y los animales lo hacen, incluso la flora y la fauna lo resienten. A una altura de 4 600 metros la cantidad de oxígeno en el aire es 60 % menor que al nivel del mar. Y esto afecta a todo pero en particular es un peligro para la vida ya que se puede causar problemas que van desde cansancio, sueño, mareos, vómitos y hasta la terrible condición de hipoxia, en la que los niveles de oxígeno en la sangre

son tan bajos que no nos permiten pensar adecuadamente y somos más propensos a cometer errores. La hipoxia puede llegar a conducir a la mortal condición de edema pulmonar en la que los pulmones se llenan de líquido causando la muerte por asfixia. Estos son los varios estados de lo que se conoce como el mal de montaña. Desde el principio las máquinas perforadoras mostraron que toda acción de trabajo o eficiencia está influenciada por la gran altura del sitio. Se comenzó a monitorear el oxígeno en la sangre de todo el personal del GTM y se restringieron los accesos a menores, mujeres embarazadas y personas con padecimientos pulmonares o cardíacos. Aunque también se observó un proceso de adaptación de las personas trabajando a la altura de la montaña que llevó a los que estaban sanos a desarrollar una mayor capacidad pulmonar al adaptarse a las condiciones del sitio a tal grado que, luego de la pausa para comer, se llegaron a jugar partidos de fútbol a la altura de 4 600 metros y en los exámenes médicos aparecían signos de adaptación a la altura, tales como bradicardia en reposo y aumento de glóbulos rojos, tal y como aparecen en los atletas de alto rendimiento que se entrenan a grandes alturas. No obstante, trabajar en la montaña sigue siendo un asunto que se debe tomar con precaución, ya que hasta algunos periodistas y reporteros de varios países que fueron a hacer sus reportajes al sitio del GTM, estando sólo unas horas en el sitio, han llegado a sufrir desmayos y demás efectos de la altura de la montaña. Lo importante es que aprendimos a tomar en cuenta el factor altura en todos los aspectos del diseño y durante la construcción. Actualmente la operación del telescopio exige tomar decisiones basadas en cálculos matemáticos y realizar otras tareas intelectualmente exigentes o complejas. Dentro del llamado “nivel 20”, donde se encuentra el equipo de cómputo de monitoreo y control el termómetro marca habitualmente 0 grados.

Camino de acceso

Una vez establecido el diseño, el primer paso era la construcción del camino hasta la cima de la montaña. El Estado de Puebla participó activamente en esta tarea que también benefició a las poblaciones de Atzitzintla y Texmalaquilla que no contaban con buenos caminos de acceso. Se construyó un camino de alta montaña desde Atzitzintla hasta la cima de la montaña, pasando por Texmalaquilla. El camino se une más arriba con otro que parte de Ciudad Serdán y que es utilizado por los alpinistas para llegar al refugio y escalar el Pico de Orizaba. Un poco más adelante,

el camino se bifurca hacia la cima de La Sierra Negra, donde se colocó una pluma de acceso. Paradójicamente la existencia del camino al futuro observatorio alentó la actividad de los tala bosques, y es entonces cuando recayó sobre el proyecto la tarea de vigilancia y reporte de esta deplorable actividad, que tuvo que controlarse y regularse, pero también el proyecto del GTM se avocó a la reforestación de la zona plantando miles de árboles en las laderas de la montaña, árboles y especies endémicas que en la actualidad se han desarrollado sanos ayudando al entorno local. Desde entonces se establece una colaboración ambientalista con las comunidades aledañas que relataremos posteriormente.

La construcción de camino hacia la cima no fue una tarea nada fácil, sobre todo porque por ese camino se transportarían todas las partes del telescopio, muchas de las cuales son de pesos muy grandes, y el camino tendría que soportar el paso de maquinaria pesada y camiones trailer con muchos ejes. Las curvas cerradas de un camino de alta montaña son verdaderos problemas para maniobrar este tipo de vehículos y las condiciones meteorológicas del lugar con fuertes lluvias, vientos, nevadas, granizadas y deshielos corriendo cuesta abajo hacen al camino muy vulnerable y peligroso, por lo que no sólo se trataba de construirlo sino también de mantenerlo en buen estado. Hasta la fecha se sigue trabajando en mejorar el camino con adoquinados, empedrados y cunetas para encauzar los flujos de agua tratando de conservar el camino en las mejores condiciones posibles. Esto por supuesto representa erogaciones económicas importantes para el proyecto pero son necesarias para mantener el acceso y transporte de enormes cantidades de materiales, estructuras, maquinaria, equipo y por supuesto personal hasta la cima de la montaña.

Otro camino que se tuvo que acondicionar fue el tramo desde Atzitzintla hasta Texmalaquilla, que era un camino rural de terracería. El Estado de Puebla contribuyó también en esta obra pavimentando este tramo, que además conectó al pueblo de Texmalaquilla con un acceso más digno y bueno para transportar sus productos agrícolas papa, nabo, zanahoria, calabaza y también borregos y cabras.

El tránsito cada vez más frecuente de maquinaria y equipo hacia la cima de la montaña comenzó a provocar alguna preocupación en las poblaciones aledañas que en ocasiones se molestaban por tan frecuente e insólito ajetreo. Hubo necesidad de

conceder ayudas y beneficios a las comunidades para apaciguarlas. Más adelante los beneficios del GTM fueron muy grandes para ellos, algo que se contará en otro capítulo de esta investigación.

A la perforación de las pilas para la cimentación, ya nos referimos anteriormente de manera muy somera, pero, según refiere el entonces director del proyecto, aún antes de tener el camino a la cima, se logró subir la primera perforadora de cuatro toneladas de una forma increíble. Con la cooperación de los habitantes de los pueblos aledaños, ¡se subió arrastrada con cuerdas y troncos por centenares de hombres con cuerdas y troncos a la manera Egipcia!

Cimentación

La maquinaria de perforación de una manera u otra llegó al sitio y como ya dijimos comenzó a perforar las pilas, descubriendo que la eficiencia de las máquinas estaba muy disminuida a causa de la falta de oxígeno en el aire a la altura de 4 600 metros que afectaba el funcionamiento de sus motores diesel. Esta deficiencia de oxígeno deteriora el funcionamiento de todo, hasta las computadoras fallan a esta altura, y por supuesto, el físico y la mente humana.

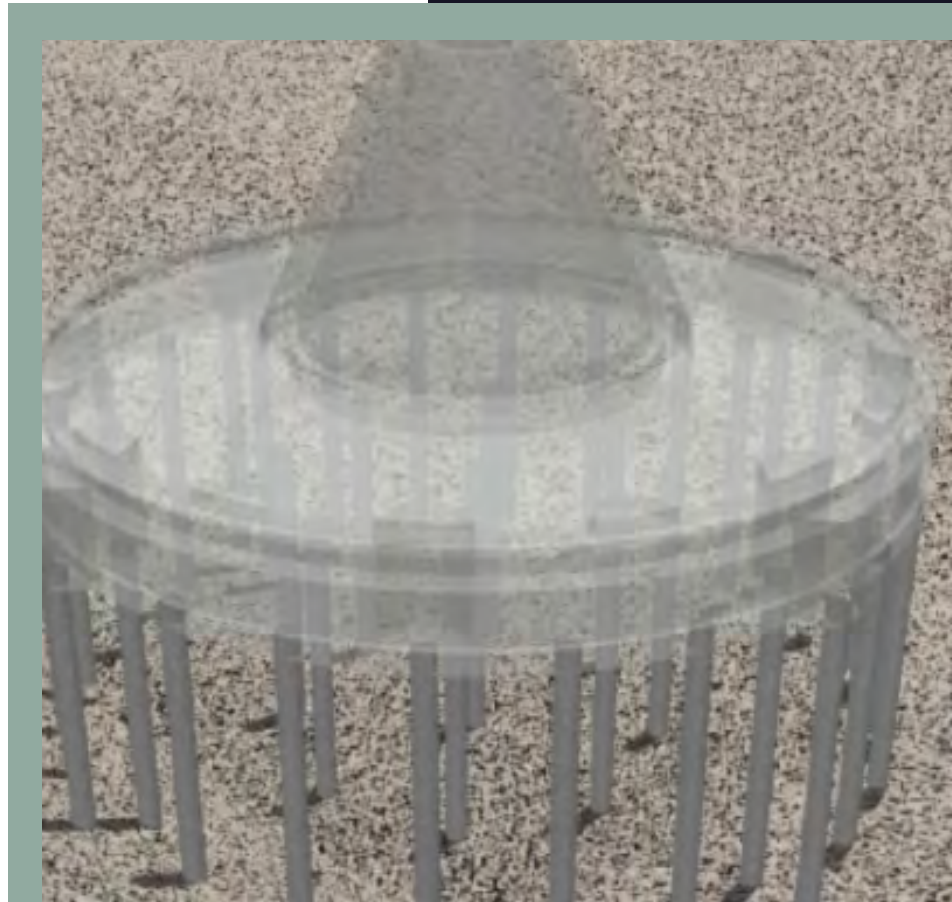
Las perforadoras tuvieron que ser reemplazadas por máquinas alemanas más poderosas, pero aun así el tiempo para perforar se alargó mucho más de lo planeado inicialmente. La capacidad de los ingenieros topógrafos mexicanos se vio ampliamente demostrada en esta tarea, pues fueron los responsables de controlar que la perforación y el colado de las pilas satisficiera los estrictos controles de verticalidad y calidad.

Una vez perforados los pozos para las pilas de cimentación había que colar el concreto armado para formarlas. Y por supuesto el concreto se comporta diferente a esa altura, y dado que México es uno de los países con mayor producción y experiencia en concretos la tarea recayó en una de las más famosas empresas nacionales especializadas en cemento y concreto: Cemex, empresa mexicana de cobertura transnacional y presencia en varios países del mundo. Esta fue capaz de desarrollar el concreto específico para las condiciones del sitio, y no sólo eso sino que también sabiendo que se utilizaría mucho concreto en la construcción del GTM decidió

establecer una planta de concreto en el propio sitio del telescopio. Así, en lugar de llevar el concreto en camiones revolvedores a la cima, se empezó a producir en el propio sitio. Se probaron sesenta mezclas diferentes con agregados especiales antes de elegir tres de ellas como las más adecuadas y eficientes para cumplir con las especificaciones en las condiciones de la montaña.

El principal problema al que se enfrentó la planta de concreto en el sitio fue la obtención del agua necesaria para la mezcla. Se había determinado que la calidad del agua en la mezcla de concreto debía cumplir con especificaciones estrictas ya que las bajas temperaturas del sitio hacían más complicado el proceso de fraguado, por lo tanto, hubo necesidad de transportar y calentar el agua a 70 grados Celsius para mezclar el concreto, lo que es laborioso, pero definitivamente más conveniente que transportar el concreto premezclado. Las operaciones de colado en el GTM llegaron a ser de proporciones enormes pues la cantidad de concreto que se usó finalmente alcanzó cifras enormes de metros cúbicos colados. Tan sólo la estructura

Figura 3. Imagen virtual de la cimentación.



de cimentación llegó a los 5 400 metros cúbicos de concreto reforzado. En la Figura 3 se ve en color marrón la parte fabricada en concreto, aunque falta agregar la parte de las pilas de cimentación.

Además de construir los cimientos y la estructura básica del edificio del GTM, con especificaciones para soportar movimientos telúricos hasta de nueve grados en la escala de Richter, el edificio cuenta con paredes de concreto sumamente anchas que forman la planta baja, donde están las habitaciones, la cocina los almacenes y las salas de reunión. Existe una estructura fundamental para el funcionamiento del telescopio: se trata de un tronco cono de concreto de 15 metros de altura en cuya parte superior se aloja el rodamiento o balero de azimut. Este rodamiento es el responsable de que el edificio entero gire sobre su eje con gran precisión, siendo un balero de 4.2 metros de diámetro. El tronco cono en consecuencia debió ser colado en concreto armado con una precisión milimétrica. Esto implica hacer un armado y una cimbra muy especial que permitiera el colado preciso del concreto y además calcular perfectamente las contracciones y deformaciones que el concreto presenta al fraguar.

La sola cimbra y el armado de acero para colar el tronco cono en el centro exacto del edificio es por sí sola una tarea muy específica y delicada. Posteriormente, el colado del concreto, el control del fraguado y el retiro de la cimbra fueron tareas de gran detalle. El centro del tronco cono es por así decirlo, el eje central del edificio y la referencia primordial de todos los parámetros geométricos del telescopio. El cono es hueco y su centro se proyecta hasta el piso de la planta del sótano donde se establece la marca fiducia que da origen a todas las demás coordenadas de la gran estructura y la antena. Desde este centro único, parten todas las líneas imaginarias que hacen referencia a todos los puntos del telescopio, y por esta razón en ocasiones se le llegó a llamar coloquialmente “El centro del Universo” y se establecieron ventanas y conductos que a partir de este gran centro permiten enviar rayos de luz láser desde este origen físico a los diferentes puntos clave del telescopio para establecer y comprobar posiciones.

La siguiente parte desafiante en cuanto al colado de concreto es la cama básica para soportar la pista de rodaje de la alidada. Se trata de una rotonda de concreto macizo de 40 metros de diámetro, que soporta la precisa pista de acero sobre la cual se apoyan cuatro carritos que se sostienen a las cuatro patas de la alidada al girar en

azimut. Esta cama de concreto debe ser concéntrica y muy rígida pues sobre ella cae toda la carga vertical del telescopio a través de los carritos que ruedan sobre la pista de acero alineada y plana. Aquí nuevamente se tuvo que emplear el desarrollo del concreto especial y la cimbra de precisión, además alrededor de toda la circunferencia se colaron anclas con tornillos, que posteriormente, se usarían para sujetar y alinear la pista de acero que va asentada sobre la cama de concreto con un cementante especial denominado grout que tiene propiedades de rigidez e incompresibilidad mucho más adecuadas para sostener la pista y el enorme peso del instrumento.

Finalmente las estructuras de concreto fueron terminadas y monitoreadas en cuanto a su calidad y resistencia para comenzar a instalar las partes mecánicas y estructurales de acero.

El balero de azimut

Este rodamiento especialmente fabricado en Alemania para el proyecto GTM es una pieza muy especial. Se trata de un balero de 4.2 metros de diámetro que es responsable de conectar y controlar la parte fija del edificio con la parte móvil del telescopio. El cono de concreto permanece estático y fijo a la tierra mientras que toda la estructura de acero que forma el telescopio en sí tiene que girar en azimut y elevación para posicionar y guiar la antena. Es este balero el responsable de resistir las cargas laterales de toda la estructura y conservar la rotación perfectamente concéntrica. El rodamiento tuvo que realizar una tortuosa jornada de transporte desde su lugar de fabricación hasta el sitio del telescopio, ya que su dimensión con el empaque incluido llega a los 5 metros de diámetro y sobrepasa los límites de transporte en carriles carreteros y ferroviarios. El balero con su embalaje de 5 metros en posición horizontal supera el ancho de los caminos, y en posición vertical supera el límite de 4 metros 20 centímetros, las alturas permitidas bajo los puentes y pasos a desnivel. Entonces fue necesario construir un soporte de madera para transportarlo en un ángulo de inclinación de tal manera que pudiera cumplir con las normas de transporte. Aún así la altura permitida para pasar por debajo de los puentes no era suficiente, ya que las plataformas de los camiones son bastante altas de origen, por lo que hubo necesidad de usar trailers de cama baja que, como su nombre lo indica, tienen las plataformas más bajas y cercanas al suelo.

El balero fue transportado primero desde el puerto de desembarque hasta la ciudad de México, con toda la problemática que implica circular en muy transitada capital del país, para que la empresa constructora de la estructura de la alidada pudiera presentarlo y colocarlo en su alojamiento para verificar que embonara con precisión. De ahí fue transportado al estado de Tlaxcala donde otra empresa especializada en lubricantes y fluidos le instaló un sistema de venas para su correcta lubricación de mantenimiento y protección contra el ambiente. De ahí comenzó el camino por la autopista hasta llegar a Atzitzintla e iniciar un tortuoso ascenso a la cima de la montaña para su instalación sobre la cúspide del tronco cono. La instalación del balero en el centro preciso del tronco cono y por ende del edificio entero fue una tarea complicada y muy precisa. Fue necesario hacerlo con mucho cuidado asegurando que quedara colocado perfectamente concéntrico al cono ya que de ahí depende que el movimiento de azimuth fuera el correcto. El balero se fijó sobre su correcta posición con anclajes y cementantes, usando instrumentos topográficos de alta precisión como estaciones totales y trazadores láser. Como siempre una vez colocado y cementado ya no hay marcha atrás ni manera de corregir ningún error que hubiese existido, sólo había que esperar que el fraguado terminara por estabilizarlo. Una vez terminado este ensamble se podría comenzar a desarrollar el armado y ensamble de la alidada a partir de la plataforma giratoria apoyada en el balero de azimuth.

Alidada inferior

Desde la plataforma giratoria, que es cuadrada, parte la estructura de la alidada, que es ya la primera de las grandes estructuras movibles del telescopio, cuatro grandes patas conectadas a la plataforma parten diagonalmente hacia la rotonda de concreto, donde posteriormente se conectan a los carros llamados *boogies* que rodando con cuatro ruedas de acero sobre la pista soportan el peso del telescopio móvil. La complicada estructura de la alidada parece formar una pirámide truncada de cuatro lados. Provisionalmente se soportó sobre monumentos de posición fiducial actuando también como bases cimentadas en el suelo, mientras se construía la pista y se instalaban los *boogies*. Esto permitió continuar con la construcción de toda la estructura como si fuera a ser inmóvil. Son muchos los elementos estructurales que forman la alidada inferior y, como siempre, el armado y soldado de todas

sus partes debe ser hecho con mucha precisión y control de calidad teniendo en cuenta las condiciones de bajas temperaturas y falta de oxígeno del sitio, además se deben controlar las deformaciones provocadas por el calor de la soldadura y las dimensiones topográficas de esta gran pirámide de acero soporta su movimiento sobre el edificio fijo de concreto. La altura sobre el suelo de la plataforma superior de la pirámide coincide con la del balero de azimut y tiene también una escalera que permite el ascenso a la plataforma superior.

Pista de rodamiento

La construcción e instalación de la pista de rodamiento sobre la rotunda base para sostener la alidada sobre los *boogies* fue uno de los mayores retos del desarrollo mecánico del GTM. La circunferencia perimetral de pista es de 120 metros aproximadamente y se debe hacer de varias secciones de arcos, cada arco fabricado en acero de alta resistencia con forma de T invertida y 230 milímetros de espesor con un ancho de 450 milímetros y 6 metros de desarrollo.

Instalar la pista sobre la rotunda con una precisión adecuada tanto en circularidad como en planicidad representó uno de los retos más grandes para la construcción del telescopio. La pista es un elemento clave para el buen funcionamiento del sistema de guiado y posición de la antena principal. No se pueden admitir errores en la planicidad de la pista porque esos errores harían que el apuntado del telescopio se modificara al pasar los carritos por bordes o baches en la pista, por eso debe ser plana dentro de tolerancias muy estrictas. También se requiere que la pista sea concéntrica con respecto al eje de azimut y que pueda soportar todo el peso de la estructura y el telescopio sin deformarse. La única manera de armar una pista de estas características es uniendo por soldadura varios tramos de pista, los tramos deben ser del mayor largo que permita estar dentro de las dimensiones de transporte permitidas. Al igual que el rodamiento de azimut las secciones de pista fueron encargadas a una empresa especializada en Alemania que fabricó los tramos con el perfil adecuado en acero al níquel, cromo, molibdeno A 543 tipo C, templado y revenido para obtener la dureza necesaria en acero para soportar el pesado trabajo de sostener al enorme aparato y los constantes pasos de los carritos sobre la pista

Se recibieron los tramos necesarios para formar el círculo más un par de tramos extra para sustituir en caso de cualquier eventualidad. Ahora venía la tarea más difícil: instalar todos los tramos y unirlos con soldadura para formar la pista cumpliendo con todas las especificaciones y tolerancias requeridas. Esta tarea requería la colocación precisa de cada uno de los tramos y la soldadura al siguiente tramo y así sucesivamente hasta cerrar el círculo con un último tramo de pista que debía ser recortado con gran precisión para embonar perfectamente y cerrar el círculo.

Pero además de los problemas inherentes a la precisa colocación de cada tramo, existía el problema de la soldadura, ya que el calor de la soldadura produce deformaciones en el acero que se manifiestan como bordes y o baches sobre la pista, cosa que como se sabe es inaceptable. Otro gran problema es la posibilidad de que el calor de la soldadura produzca revenido en el acero y como consecuencia disminuya su dureza. Otro asunto es la indeseada magnetización de la pista, que se puede dar por el paso de las corrientes eléctricas que se dan en el proceso de soldado. Por si fuera poco las condiciones de temperatura tan bajas en el sitio son un obstáculo más para mantener el acero en la temperatura ideal para ser soldado.

Todos estos factores tan complicados para la instalación y soldado de la pista llevaron a largas discusiones de planeación con el fin de desarrollar el mejor método de soldadura y posicionamiento de la pista. Se contó con la colaboración de varias empresas e ingenieros expertos de diferentes países para determinar el mejor procedimiento de soldado y posicionamiento de la pista. Después de muchas sesiones de trabajo y análisis se logró un procedimiento aprobado para efectuar la tarea. El procedimiento era complicado y tardado, además de costoso, pero necesario para lograr el objetivo de tener una pista adecuada a las necesidades de este telescopio de clase mundial.

Como resultado de las conversaciones y análisis de las posibilidades para efectuar la tarea, se decidió usar el método de soldadura conocido como *narrow gap* o soldadura de ranura estrecha. Consiste en cortar un ángulo ligero en cada extremo de las piezas por soldar para que al unirlos formen una ranura en forma de V. Esta ranura se rellena entonces poco a poco con soldadura hasta llenarla por completo y así se unen los dos extremos con gran confiabilidad y resistencia usando la menor cantidad de soldadura, lo que somete a las piezas al menor tiempo de

calentamiento y en consecuencia a menor deformación y reducción de la dureza. Sin embargo, la deformación, aunque es menor, sigue estando presente. No se pueden evitar las deformaciones por lo que hay que compensarlas de alguna manera, y esto se logró contra deformando las partes al soldarlas para que la deformación esperada se recuperada al enfriarse la soldadura. Para tal efecto se construyó un aparato de medición y control llamado *splice plate* o placa de empalme consistente en una estructura sobre la que se montaron una serie de palpadores micrométricos y ópticos que podía medir las variaciones de los tramos de pista en varios puntos, antes y después de la soldadura. Las partes a soldar deben ser precalentadas y cubiertas con un encofrado durante todo el proceso, para evitar que los fríos vientos de la montaña disminuyan su temperatura, y el ambiente dentro del encofrado debe ser controlado con gases raros para facilitar la soldadura. El encofrado debe ser lo suficientemente grande para que estén presentes los técnicos soldadores y el personal de control y apoyo además del equipo de soldadura que consiste en un robot que aplica la soldadura muy uniformemente. Tanto en la parte superior de la pista como en los costados la soldadura debe sobrepasar los límites de la sección transversal, por lo cual se sueldan extensiones con la forma de la V de la ranura angosta para sobre soldar y dejar material excedente que será removido cuidadosamente al final del proceso de soldado. Todo el procedimiento se hace con el mayor cuidado posible para evitar los efectos no deseados ya mencionados de la soldadura. Pero aún hay detalles importantes y es que en el vértice inferior de la ranura en forma de V se concentran esfuerzos que hay que eliminar pues de lo contrario acaban deformando la pista y pueden hasta llegar a producir fracturas. Un ejemplo muy conocido del problema de concentración de esfuerzos fueron las fracturas que sufrieron las ventanillas del famoso avión *constellation* que por ser cuadradas y tener sus esquinas en ángulo recto acabaron por fracturarse con el consabido peligro que esto provoca en un vuelo. Desde entonces todas las ventanillas de los aviones se fabrican con las esquinas redondeadas, lo que releva los esfuerzos concentrados. De la misma manera en cada uno de los vértices de la sección en forma de V de las soldaduras fue necesario perforar un agujero redondo a todo lo ancho del perfil de la pista para relevar los esfuerzos concentrados en ese punto.

La siguiente tarea en cuanto a la soldadura consistió en remover los excesos de material depositados por la soldadura en cada unión. Al remover estos excesos se espera que la unión soldada quede perfectamente acoplada entre una pieza y la siguiente

a tal grado que ni siquiera se note que son dos piezas unidas por soldadura, y que conserven sus características físicas y de dureza en todos los puntos de la soldadura así como del tramo de pista original.

El trabajo de perforar el agujero para relevar los esfuerzos y de remover los excesos de la soldadura con todo y las extensiones que permitieron aportar el exceso es una labor de maquinado de precisión que se hace normalmente con un taladro y una fresadora. Es un proceso relativamente sencillo cuando se hace en un taller mecánico de precisión llevando la pieza a ser maquinada a la máquina correspondiente, pero hacerlo sobre una pieza enorme ya soldada y colocada en su lugar, en las condiciones de la montaña, y sin dañar la soldadura, implica esta vez llevar la máquina a la pieza a trabajar, en lugar de llevar la pieza a la máquina, y es cierto que no existe una máquina para taladrar y fresar que fuera hecha para este particular propósito. En consecuencia, fue necesario construir una máquina herramienta especial que se pudiera sujetar en la propia pista y que pudiera taladrar y fresar con precisión sobre las uniones soldadas. Esta máquina se montaba de una unión a la otra para realizar su trabajo en cada una de las uniones soldadas. Fue un proceso lento y cuidadoso,

Figura 4. Maquinando el agujero para relevar esfuerzos.



sobre todo la parte de perforar el agujero para relevar los esfuerzos en el vértice de la sección en V, pues es necesaria una broca muy larga y proceder con extremo cuidado para que el agujero no se desvíe.

En cuanto a la alineación de cada segmento también se tuvo que proceder con mucho cuidado, primero para colocar cada tramo de pista en la posición correcta, y luego para monitorear su exacta colocación y permanencia durante todo el proceso. Para este fin se usaron trazadores láser y estaciones totales, equipos de última generación en el estado del arte, manejados por compañías y técnicos altamente especializados.

Cada tramo debía ser colocado, alineado y retenido en su punto exacto para ser soldado, manteniendo las especificaciones y estrictas tolerancias. El último tramo a ser colocado y soldado debería coincidir perfectamente de manera que el círculo se cerrara y toda la pista quedara a la perfección.

Una vez terminado el proceso de soldado y maquinado de toda la pista se procedió a un ajuste más fino con los tornillos de ajuste y las anclas instaladas a lo largo de todo el perímetro interior y exterior de la rotonda para finalmente aplicar el cementante que dejaría a toda la pista rígidamente anclada al edificio fijo del gran telescopio. El trabajo fue bastante delicado y tardado pero al final se logró tener una pista adecuada para las necesidades del radio telescopio de ondas milimétricas más grande del mundo.

Alidada superior

Esta segunda estructura sobre la plataforma que se forma en la parte truncada de la pirámide de la alidada superior consta básicamente de dos triángulos, uno a cada lado, que en el vértice superior tienen cada uno una chumacera con rodamientos y que establecen una línea virtual entre sus centros. Esta línea es el eje de elevación de la antena, el segundo eje movable del radiotelescopio que le permite levantar la antena desde el horizonte hasta el zenit. Junto con el movimiento conjugado de la alidada permiten que la antena se apunte a cualquier posición en la bóveda celeste, y además entre ambos ejes moviéndose de manera simultánea, permiten

seguir el paso aparente de los objetos en el cielo mientras la tierra gira. Es claro que estos dos movimientos actuando juntos deben tener, al menos, la misma velocidad que tiene la tierra al girar. En ocasiones deben compensarse sus movimientos para corregir varios efectos, como la carga de viento, los cambios de temperatura y hasta las pequeñas irregularidades que tiene la tierra al girar. En consecuencia, la exactitud de los ejes es crítica y se deben ajustar con la mayor precisión posible en sus dimensiones y mantenerse ortogonal al eje de azimut, es decir, el eje central del cono y del balero de azimut. La alidada superior está conectada a la alidada inferior por su base, mientras que en su parte superior se colocan las chumaceras perfectamente alineadas y colineales. No existe un eje físico de elevación que conecte ambas chumaceras, porque en ese espacio del eje pasan los haces de radiación captados por la antena. En cambio, en la parte exterior de cada chumacera sí que hay un eje que se conecta a enormes medias lunas pivotadas por su parte plana a las chumaceras del eje de elevación y que además funcionan como contrapesos para balancear el enorme peso de la antena. Su parte plana en consecuencia forma una plataforma que se balancea en el eje de elevación y sobre esta plataforma descansa la base de la antena. Mientras que en la parte redonda exterior de las medias lunas están las cremalleras que permiten aplicarles el movimiento de elevación con cuatro motores situados dos a cada lado. En la parte interior de las medias lunas llamadas *ballast cantilevers* o balastos de contrapeso, se agrega peso distribuido uniformemente para balancear la antena efectivamente y lograr que los motores ejerzan la menor fuerza posible al mover la antena en elevación. El balance correcto permite además que la antena descansa en una posición de seguridad por su propio balance en el caso de que hubiese alguna falta de energía motriz. Para instalar los dos balastos sobre cada una de sus chumaceras fue necesario el uso de una gran grúa que los elevara hasta su posición de descarga sobre las chumaceras, pero además el anillo central del balasto debía embonar perfectamente con el eje de la chumacera, con tolerancias muy exactas. Esta tarea tan delicada se logró calentando el anillo central del balasto para expandir su diámetro y hacerlo más grande, mientras que la baja temperatura del sitio mantenía el eje de la chumacera ligeramente contraído, con esto se facilitaba el delicado ensamble. Durante la izada, un operador dentro del anillo del balasto se mantuvo calentando la superficie interior del anillo. Finalmente salió cuando se logró el ensamble y se colocaron los tornillos de fijación. La operación se repitió para cada lado hasta que los dos contrapesos quedaron instalados, alineados y preparados para recibir la estructura de la antena.

Figura 5. Se puede apreciar el tronco cono en el interior, la rotunda con parte de la pista siendo instalada, la alidada inferior en forma de pirámide truncada, la alidada superior con los contrapesos instalados y la estructura del edificio móvil donde estarán los pisos de control, de observación y de detectores.

Nótese el tamaño de personas y vehículos que nos dan la escala de las dimensiones del telescopio.



Edificio

Sobre las alidadas superior e inferior y formando parte de la plataforma giratoria sobre el tronco cono se construyó un edificio de 32 metros de altura con tres niveles y un ático. Este edificio rota junto con las alidadas y todo el telescopio y su función es albergar en el piso más bajo, al nivel de 20.7 metros, las computadoras de control de todo el telescopio que regulan los movimientos, los controles de temperatura de toda la estructura, el control de la superficie adaptativa de la antena, el enfoque, el balance y una gran cantidad de variables. El siguiente nivel es el 25 metros. Aquí es donde los astrónomos y técnicos estarán haciendo las observaciones, mientras que en el nivel superior a los 29 metros está el espejo terciario que dirige la radiación colectada por la antena a los diferentes receptores que pueden recolectar los datos para ser procesados. Finalmente, en la parte superior, están los mecanismos de los elevadores, una grúa de carga que soportada en una viga extendida hacia el exterior del edificio permite elevar equipos pesados y un tanque de agua elevado para suministro de necesidades inmediatas. En cada nivel hay un acceso al elevador de personal y al lado una escalera para ascenso normal a pie que además desciende hasta el nivel de la rotonda donde está la pista de rodamiento. En el nivel de 8 metros está la plataforma de transición entre la parte móvil y la parte fija, ahí está la base del elevador y otra grúa más pequeña para descargar camiones con equipo. Hay un acceso al interior del tronco cono de donde parte una escalera de caracol de emergencia que llega a una escotilla en el nivel 20.7. Pero más importante aún es la presencia en este nivel del llamado “*Cable Wrap*” o enrredacables; un ingenioso sistema que permite llevar una enorme cantidad de cables eléctricos, telefónicos, control y de datos desde la parte fija hasta todos los puntos en la parte móvil del telescopio. No sólo lleva cables sino que también, en una posición específica de reposo, permite conectar mangueras para subir el agua al tanque elevado y hasta un tubo flexible que puede descargar desechos. El *cable wrap* permite girar el telescopio en azimut hasta vuelta y media en cada dirección sin que ningún cable se tuerza, se doble o se rompa. Toda la energía necesaria en la parte móvil del telescopio es suministrada a través de este ingenioso sistema. Más arriba en el edificio existe otro Cable Wrap que lleva los cables a la parte de la antena que tiene su propio movimiento de elevación y que también requiere de muchos cables que la alimenten para su funcionamiento.

Estructura de soporte de la antena

La parte medular del Gran Telescopio Milimétrico es sin duda su enorme antena de 50 metros de diámetro, capaz de recolectar las emisiones en longitudes de onda milimétricas procedentes desde enormes distancias en el universo. Entre más grande sea la antena mayor será la capacidad de recolección de esta radiación y el GTM con su antena de 50 metros cuenta con una superficie de 2 000 metros cuadrados de recolección. Esta característica lo convierte en el radio telescopio de ondas milimétricas más grande del mundo.

Una antena con estas dimensiones es necesariamente bastante pesada y al ser necesario que se mueva con la precisión astronómica que ya hemos referido, la convierte en un reto estructural muy complejo. Como todo el instrumento, debe ser rígida, estable, precisa y controlable ante cambios por temperatura, cargas de viento y distribución de cargas gravitacionales. Lo más importante es que toda su superficie colectora debe reflejar la radiación con gran precisión a un foco único donde se recibirán los datos. Es una característica de las parábolas de revolución reflejar la radiación sin deformarla ni aberrarla a un único foco, y la magnificación obtenida en el proceso depende del diámetro de la parábola, de la distancia focal y de la calidad de la superficie parabólica. En cuanto a la distancia focal, entre más larga sea, mayor será la amplificación pero esto implica hacer un telescopio muy largo y por ende más inestable. En lugar de eso, se aumenta la distancia focal colocando un espejo secundario en el foco, que refleja nuevamente la radiación hacia un agujero en el centro de la antena y lo dirige al cuarto de receptores de manera que la distancia focal se duplica. Con este principio, en el GTM se utiliza un espejo convexo para alargar más esa distancia focal sin aumentar la geometría del telescopio haciéndolo más rígido y estable. Por esta razón el espejo secundario se diseñó convexo de forma hiperbólica. La estructura del espejo secundario está soportada por cuatro patas que partiendo de puntos equidistantes en la superficie de la antena forman un tetrápodo que termina en un cilindro hueco. La estructura de soporte del espejo secundario es móvil de tal forma que permite ajustar el secundario para posicionarlo en las 3 direcciones perpendiculares (x , y , z) y dos rotaciones (alrededor de x , alrededor de y) y enfocar correctamente. Esta estructura es un robot hexápodo.

Por lo que respecta a la superficie reflectora, debe ser suficientemente lisa para no deformar la reflexión tal y como en un espejo parabólico óptico. Se requiere que la superficie refleje una imagen sin distorsiones. Para lograr una buena imagen, la superficie no debe tener errores mayores a una fracción de la longitud de onda de la luz que se pretende captar, en el caso de las ondas milimétricas la longitud de onda de la luz es invisible al ojo humano pero sigue siendo una radiación electromagnética, tal como lo es la luz visible, sólo que esta vez son los detectores especiales los que hacen la función del ojo y pueden captar esa luz de longitud de onda invisible al ojo humano. Para lograr una reflexión sin pérdidas entre la superficie de la parábola y la superficie de los demás espejos que guían el haz hacia los detectores es necesario que la calidad de todas las superficies sea similar a la de un espejo. Mientras más pequeña sea la longitud de la onda que se quiere reflejar, más alta debe ser la calidad del espejo. Por tanto, es extremadamente necesario que la estructura que soporta la superficie de la parábola sea muy rígida para que no se deforme por su propio peso.

Figura 6. La estructura de la antena ensamblada en el piso.



Para el proceso de construcción de la estructura de soporte de la antena se debía tomar una decisión muy importante: la primera opción era armar la estructura de la antena en el piso a un lado del edificio en construcción, para después izarla a su posición sobre la plataforma de los contrapesos a una altura de 32 metros sobre el suelo. La segunda opción era armar la estructura de la antena directamente sobre su plataforma a los 32 metros subiendo parte por parte. Ambas opciones tenían sus pros y sus contras. Armar la antena en el suelo facilitaría el armado y la medición de todos los parámetros, haciéndolo a una altura mucho más accesible para el personal y las grúas, además se podría comenzar el armado sin tener que esperar a que los contrapesos y su plataforma estuvieran completamente terminados, es decir, un equipo podría trabajar en la estructura de la antena mientras el otro podría continuar en paralelo con la construcción del resto de las estructuras y del edificio. El inconveniente principal era que al terminar de armar la estructura de la antena había que izarla con su enorme peso y dimensión hasta la altura de su reposo. Esta era una tarea monumental que nunca se había hecho por ninguna grúa y mucho menos en las condiciones de la altura de la montaña.

Por otra parte, armar la estructura pieza por pieza a la altura de su plataforma podría ser relativamente más fácil en el sentido de ir subiendo y soldando pieza por pieza ya en su lugar final, pero por otra parte representaba un problema para hacer las mediciones y alineaciones con precisión y un mayor riesgo para los trabajadores, que tendrían que laborar sobre andamios muy altos a alturas muy grandes. Además, el armado debía hacerse conservando el balance del peso para evitar que un lado llegase a pesar más que el otro y provocara un desbalance o torcedura en toda la estructura, de manera que no era una decisión fácil, pero finalmente se decidió armarla en el piso con más seguridad, y buscar una compañía capaz de izarla hasta su posición final en el telescopio. Pocas grúas son capaces de hacer semejante maniobra, de hecho por esos tiempos se desarrolló una empresa mexicana encargada de izar los tramos de puentes prefabricados para el llamado “segundo piso” de las vialidades del entonces Distrito Federal, hoy Ciudad de México. La compañía de grúas ESEASA fue invitada a valorar la posibilidad de lograr la izada y después de rigurosos estudios determinó que sería necesario hacer la maniobra con dos de sus grúas más grandes y poderosas. Una de las grúas debía rotar alrededor de una posición estacionaria, mientras que la otra sería móvil y haría el acercamiento hacia el telescopio de manera simultánea mientras la primera rotaba. Las grúas en cuestión estaban bastante

ocupadas en la construcción del segundo piso de las vialidades de la capital del país pero buscarían una ventana de oportunidad para poder transportarse a la cima de la montaña para realizar la magnífica tarea de izar la estructura de la antena.

Con ese plan en mente se apuró el ensamble de la estructura de la antena sobre el suelo donde se prepararon cimientos especiales para comenzar el desarrollo de la enorme estructura. Poco a poco fue tomando forma y las dimensiones sorprendían a propios y extraños pues revelaba la realidad de la magnífica dimensión de la antena. Hablar de una antena parabólica de 50 metros parece simple pero comenzar a ver el desarrollo de semejante estructura provocaba admiración e incredulidad al mismo tiempo. Como referencia, el imponente patio central del Palacio Nacional no es suficientemente grande para albergar la antena parabólica. Colocada de manera vertical, es más alta que el Ángel de la Independencia, tan alta como el famoso arco del triunfo de París, pero más baja que el Monumento a la Revolución.

Así se pudo avanzar en paralelo en la construcción del telescopio como un todo, mientras continuaron los planes para realizar todas las tareas faltantes y se preparaba el terreno para finalmente recibir las enormes grúas que iban a realizar la izada monumental. Para poder llevar las grúas al sitio fue necesario transportarlas desarmadas. Las partes fueron llevadas a la cima de la montaña en trailers especiales, ya que algunas de sus partes tienen exceso de dimensiones. Fueron necesarios del orden de ochenta viajes en trailers sólo para llevar las grúas a la cima. Un hecho interesante es que una grúa más fue necesaria para poder armar las grúas grandes que elevarían la estructura.

La maniobra de la izada fue un momento espectacular y de gran tensión. Los preparativos fueron largos y escrupulosos. Una larga cama de polines de madera fue colocada en la trayectoria de la grúa móvil como si fuesen durmientes de una vía de tren para permitir que la grúa se desplazara, mientras que la otra grúa fija se colocó sobre una cimentación especial. Se fabricó un balancín para que ambas grúas pudieran sujetar la enorme estructura, izarla y luego, con expertos movimientos sincronizados de gran precisión, llevarla hasta su posición final a 32 metros de altura sin el menor titubeo. En realidad fue una muestra de la gran capacidad de los operadores y la empresa de grúas que bien ganado tienen la mención de su nombre: ESEASA. Es la compañía que logró la hazaña que por varios minutos detuvo la respiración de

todos los que presenciaron la increíble maniobra. En cuanto la estructura estuvo colocada sobre su base con precisión milimétrica, un grupo de soldadores expertos procedieron a soldarla a su base. Las grúas permanecieron sosteniendo la estructura por varios días hasta que la soldadura fue lo suficientemente extensa para liberarlas. Entonces por primera vez se pudo tener una vista con las dimensiones reales, en general, de lo que sería el coloso de la astronomía mundial.

Este hito ya marcaba el principio de otra etapa de construcción en la que las tareas serían de mucha más precisión y cuidado.

Movimiento de azimut

Al concluir la instalación y nivelación de la pista de rodamiento, llegó el momento de soportar toda la alidada sobre los carros que le permitirían girar. Estos carros llamados *boogies* fueron fabricados en Italia debido a la gran experiencia que ese país tiene en este tipo de dispositivos. Son los responsables de permitir el giro de la alidada sobre la precisa pista de rodamiento. Consisten en un fuerte soporte con cuatro ruedas de metal y cuatro servomotores con sus respectivas cajas de engranajes reductores, lo que forma el carro transportador o *boogie*. La alidada estaba asentada sobre la cimentación fiducia para su construcción. Cuando la pista estuvo lista y la alidada terminada llegó el momento de montar los carros y liberarla de sus soportes temporales, colocando los carros sobre la pista con sus ruedas y su estructura a la alidada. Esta transición tenía que ser muy suave y todo debía ajustar perfectamente y los carros debían alinearse para permitir una rotación suave y precisa. Al momento de liberar los soportes temporales, la alidada junto con todo el telescopio no se debía presentar ningún cambio en posición pues esta ya estaba en su lugar y conectada al balero de azimut. Exitosamente se colocaron los carros y desde ese momento comenzó la tarea de alinearlos para que pudieran rodar suavemente con la menor fricción sobre la pista. Por primera vez se hizo rodar todo el ensamble, sin conectar los motores al control. En su lugar se usó una camioneta para tirar de la alidada y probar el sistema de rotación, lo que demostró que el balance era adecuado dada la poca fuerza necesaria para rodar. A esto siguió un largo proceso de alineación de los carros y una vez que la mitad de los motores estuvieron conectados se pudo rotar todo con energía eléctrica. Cuando posteriormente se instaló el resto de los

motores, el telescopio ya pudo rodar exitosamente sobre su pista con gran precisión y suavidad. Algún tiempo después se presentó un problema con una de las ruedas de un carro, ya que, tiempo atrás, durante el transporte de los carros a la montaña, uno de los camiones que lo transportaba por el sinuoso camino fue vencido por el peso del carro y este cayó a la vera del camino. Luego de recuperarlo, se instaló, pero al paso del tiempo la rueda presentó una fractura en su rodamiento. ¡Habría que cambiar la rueda! No es para nada sencillo cambiarla, como se cambia la rueda de un auto, hay que levantar el telescopio mínimamente para liberar la rueda dañada y colocar la de refacción, una tarea nada sencilla. La empresa italiana fabricante de los carros mandó un técnico a realizar la operación, lo que fue muy fructífero ya que el equipo humano del sitio aprendió el proceso para realizar esta tarea esperando nunca más tener que realizarla. Se aprovechó la ocasión para conocer el procedimiento tanto de cambio de rueda como de mantenimiento. Desde entonces los carros llamados *boogies* han rodado perfectamente sobre la pista conservando las especificaciones necesarias para la observación astronómica.

Movimiento de elevación

El movimiento de la antena en elevación permite dirigir la antena desde un apuntado al zenit hasta el horizonte, aunque dirigir la antena hacia el horizonte no tiene mucha utilidad porque observando al horizonte la capa de atmósfera que la luz, o en este caso la radiación, tiene que atravesar es mucho más grande que cuando se observa hacia el zenit. Por eso se limita el movimiento a 10 grados sobre el horizonte. El movimiento de elevación, conjuntamente con el de rotación en azimut, permite dirigir la antena a cualquier punto de la bóveda celeste y seguir ese punto mientras la tierra rota con la precisión de la rotación terrestre. Este movimiento de elevación está basado en el propio eje de elevación conformado por las dos chumaceras en la parte más alta de la alidada superior y por las cremalleras en las partes curvas de los contrapesos o balastos. Ambos balastos tienen en sus costados sendas cremalleras perfectamente alineadas y ajustadas al radio de curvatura del balastro. Las cremalleras son tan largas que fueron fabricadas y enviadas al sitio por secciones, secciones que se fueron acoplando a los balastos y alineando conforme a las especificaciones. Estas cremalleras una vez alineadas y ajustadas debían ser cementadas al balastro con un cementante llamado *grout*, que les da una adhesión

y rigidez muy fuerte para soportar el empuje de los motores que mueven toda la antena en elevación.

La instalación y sobre todo la alineación de las cremalleras fue un trabajo muy minucioso y tardado. Fue necesario colocar indicadores digitales de medición en varios puntos de las cremalleras y hacer recorridos reiterados para ir corrigiendo la alineación de cada cremallera con multitud de tornillos ajustadores a todo lo largo de su desarrollo, durante este proceso de alineación las cremalleras estuvieron sujetas a los balastos con tacones de acero, mientras que con los tornillos ajustadores se iba corrigiendo y alineando cada cremallera hasta lograr la alineación correcta. Una vez alineadas al mejor ajuste, las cremalleras fueron cementadas con el *grout*.

En esta etapa la operación se convirtió en un proceso muy complicado, porque el cementante *grout* tenía que ser colado en una sección curva y sólo se puede hacer por partes, encofrando o cimbrado cada parte colocada en su posición más baja para que la gravedad le permitiera al cementante fluir a la sección encofrada. No sólo eso representaba un problema de carácter posicional, sino que el *grout* sólo puede empezar su proceso de fraguado cuando la temperatura ambiente es superior a 14 grados centígrados, mientras que las temperaturas promedio del sitio siempre están por debajo de esa cota. Además el acceso a los balastos, y en consecuencia a las cremalleras, es en una plataforma exterior tipo terraza bastante reducida donde están también colocados los motores con sus respectivos motores reductores y soportes. A las terrazas se accede a través de unas puertas desde el nivel 20.70, donde están las computadoras de control. Para lograr cimentar la cremalleras hubo necesidad de hacer unas cimbras para la sección a ser cementada, preparar la mezcla del cementante con un proceso específico de preparación que sólo permite colar la mezcla unos minutos después de ser preparada. Pero lo más importante era calentar y mantener la temperatura de la sección por colar arriba de los 14 grados centígrados necesarios para disparar el proceso de fraguado del *grout*. Una vez que el proceso de fraguado comienza, este es exotérmico, es decir, que produce o libera su propio calor, pero no se dispara si no se tiene la temperatura mínima para comenzar.

En estas circunstancias se colocaron en el reducido espacio de las terrazas una serie de calefactores eléctricos e infrarrojos dirigidos a la sección a ser colada cubiertos por lanas minerales para tratar de evitar la disipación del calor. Como la masa de la

cremallera y el balasto es muy grande y de acero la disipación es muy grande, por lo que el procedimiento de calentar las secciones fue muy lento llegando a necesitar más de 24 horas para calentar cada sección antes de proceder al colado. Pero se trabajó en ambos lados, con un equipo en cada balastro. Para complicar más las cosas era el momento del brote de la fiebre porcina que azotó el país en esos días, y sólo un técnico especializado se atrevió venir a México desde Alemania para supervisar y apoyar en el proyecto de cementado.

Los motores de elevación están colocados en un soporte muy especial en cada una de las terrazas del nivel 20.70. Son dos motores sin escobillas controlados por las computadoras para darles los movimientos y las velocidades específicas para cada función de apuntado y guiado para evitar el movimiento de retroceso conocido como *backlash*. Un motor puede girar en un sentido con cierta fuerza, mientras que el otro lo hace en sentido contrario con una fuerza inferior, de esta manera el motor con más fuerza vence al de menor fuerza, y cuando el movimiento se invierte en sentido los motores cambian sus patrones de resistencia, así que no existe ese momento en que al cambiar de dirección se produce un pequeño error de retroceso, que es lo que se llama *backlash* y que introduce errores en los movimientos y las posiciones reales del sistema. Este sistema anti *backlash* es uno de los mayores problemas para los posicionadores en la mecánica de precisión, y en el caso del GTM se presenta en todos los sistemas de movimiento, por lo que hay que eliminarlo siempre. El otro movimiento de azimut del telescopio también cuenta con un sistema anti *backlash* en los 16 motores que lo impulsan, actuando de igual manera con la contra fuerza de los motores. En varios movimientos de todo el sistema se hace imperativo eliminar el *backlash* para asegurar el buen funcionamiento mecánico y eliminar al máximo la introducción de errores.

La antena tiene cantidad de cables de poder, datos, sensores y control en todas sus partes. Algunos cables llegan hasta el espejo secundario, otros van a todo el rededor de la antena que, como es movable, requiere de un sistema que permita que todos los cables pasen a la antena sin ser afectados por el movimiento. Al igual que la alidada la antena tiene un bucle o lazo que les da libertad al conjunto de todos los cables para avanzar y retroceder mientras la antena se mueve. Este otro sistema se denomina *Cable Wrap* o bucle de elevación. Es más sencillo que el de azimut, consta de unas charolas guía articuladas verticales que portan todos los cables, las guías forman una

especie de gusano que, según la posición de la antena, se retraen y alargan sobre un riel en forma de S, permitiéndole libertad de movimiento sin afectar a los cables. Hay una excepción a los cables que pasan por este sistema, ya que los cables de los pararrayos colocados en la antena tienen su propio bucle por el exterior del telescopio, este cable sirve para descargar a tierra las enormes cargas que se puedan producir al caer un rayo, pero no puede ir por el mismo camino que el resto de los cables para evitar que la inducción provocada por la corriente de descarga provoque daños al resto del sistema eléctrico.

Tetrápodo, hexápodo y espejo secundario

Para colocar el espejo secundario hiperbólico, que debe estar a una altura de 17 metros desde el centro de la parábola, es necesaria una estructura de cuatro patas llamada tetrápodo, cuyas patas parten desde la superficie de la antena y forman una especie de pirámide cuadrangular en cuyo vértice se coloca un posicionador sobre el cual se monta el espejo secundario. Aunque a simple vista parece una estructura muy simple, su fabricación y montaje se debió hacer de manera muy cuidadosa. Las patas deben tener una longitud exacta para que el vértice esté exactamente sobre el eje de la parábola. Adicionalmente, deben tener una rigidez muy grande pues debe conservar esa alineación con el eje sin importar hacia dónde apunte la antena, pero no deben ser muy gruesas pues bloquearían la radiación que llega a la superficie, ni deben ser muy pesadas pues sacan de balance a la antena alrededor del eje de elevación y eso obliga a incrementar los contrapesos y exigir mayor potencia a los motores del sistema de movimiento. Así como la antena fue ensamblada sobre el suelo y luego izada e instalada sobre la alidada superior, igual fue necesario izar e instalar el tetrápodo. Con un proceso más sencillo que la izada de la antena, sin embargo, requirió también de gran cuidado y precisión, especialmente porque al levantar el tetrápodo del suelo, el peso de sus propias patas ya no ancladas al suelo las hacía cerrarse naturalmente hacia el centro. Para evitar ese efecto que ocasionaría que las bases de las patas del tetrápodo no coincidieran con sus alojamientos, fue necesario soldar un marco de acero que evitara el colapso de las patas durante la izada. El marco de soporte permaneció soldado a las patas hasta que el tetrápodo fue perfectamente ajustado a la antena. Aunque la configuración piramidal es muy rígida, el vértice se desalinea unos milímetros cuando el telescopio apunta hacia

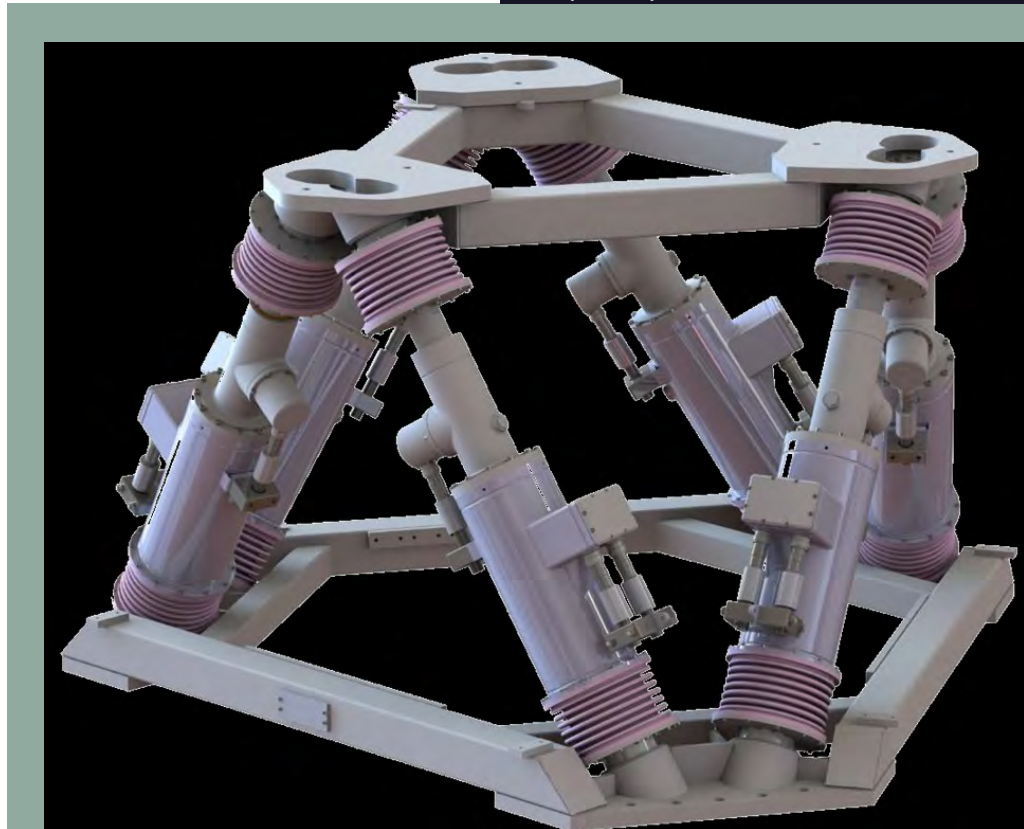
el horizonte. Por lo tanto, es necesario que el espejo secundario se coloque en una estructura móvil que pueda corregir cualquier desviación en cualquier dirección y cualquier rotación.

El robot hexápodo es el posicionador ideal que puede realizar movimientos de traslación en cualquiera de las tres ejes (expresados comúnmente con las letras x , y , z) y también los tres movimientos de rotación alrededor de estos ejes (expresados comúnmente como θ_x , θ_y , θ_z). Como su nombre lo indica, es un robot que consta de seis elementos retráctiles o también llamados telescópicos, actuadores lineales o, simplemente, “patas”. Los seis actuadores conectan dos plataformas, de tal forma que cuando se retraen o extienden permiten ajustar el espejo secundario en movimientos tanto de traslación como de rotación independientes. De esta forma el espejo secundario se mantiene perfectamente alineado con el eje de la parábola y en el lugar preciso adelante del foco, compensando la flexión que por efectos de la gravedad sufre el tetrápodo cuando apunta al horizonte. Se hizo el intento de fabricarlo en México, pero al no tener la experiencia en la fabricación de este tipo de posicionadores de tan alta precisión, se cometieron algunos errores de diseño, principalmente en la protección de las partes electrónicas y mecánicas contra la entrada de agua por descongelación, la rigidez de la estructura bajo diferentes orientaciones y la robustez de las patas en todo el trayecto de carga (*load path*). Aún así, ese primer hexápodo se pudo utilizar durante la primera luz en 2011 y las campañas de observación hasta que en abril de 2017 fue sustituido por un hexápodo nuevo más pequeño, por tanto, más rígido y con mayor capacidad de carga. El hexápodo fue fabricado por Symétrie, una empresa francesa dedicada a la fabricación de hexápodos para telescopios ópticos y radiotelescopios, así que se ganó mucha experiencia con la colaboración establecida durante el proceso de diseño y construcción.

En cuanto al espejo secundario, una hipérbole de revolución de 2.5 metros de diámetro, es también una pieza clave en el diseño óptico del telescopio. Su superficie refleja el haz de radiación hacia un orificio en el centro de la antena que lleva al interior del edificio, en el nivel 29 metros, donde están colocados otros espejos planos que conducen el haz hacia los receptores especiales encargados de recolectar la información y datos para formar los mapas e imágenes de la observación. El espejo secundario debe mantener su superficie reflejante también dentro de los parámetros ópticos precisos de fracciones de la longitud de onda de la radiación

milimétrica. Se hicieron varios intentos por fabricarlo de una sola pieza utilizando aluminio vaciado y pulido, hasta fibra de carbono. Pero no fue posible mantener la exactitud de la forma en toda la superficie. Desde la primera luz y hasta el año 2017 se realizaron observaciones con un espejo de aluminio monolítico al que se pudo pulir la parte interior con la precisión suficiente para reflejar la radiación a la parte central de la antenna. Fue suficiente mientras se trabajó con los tres anillos interiores de segmentos (que forman una parábola de 32 metros), pero cuando se lograron colocar y alinear los últimos dos anillos y con eso alcanzar los 50 metros de diámetro funcionales, el espejo monolítico ya no era una opción. La superficie en la parte externa era muy delgada y no permitía que se siguiera puliendo sin comprometer su integridad estructural. Se tomó entonces la decisión de fabricar otro espejo, pero en secciones o gajos que, al ser más pequeños, podrían alcanzar la precisión necesaria. Cada sección fue ensamblada en una estructura tubular de soporte por medio de ajustadores mecánicos similares a los ajustadores que se utilizan en la superficie de la antenna; de hecho, las secciones fueron fabricadas por la compañía Italiana Media Lario, utilizando la misma tecnología de electroformado de los paneles con núcleo de panal de abeja de aluminio.

Figura 7. Hexápodo construido por la empresa Symétrie.



El hexápodo junto con el espejo secundario forman un sistema llamado sub-reflector que juega un papel muy importante en el funcionamiento del radiotelescopio. Hay que considerar que las diferentes posiciones de apuntado y guiado de la antena, junto con las cargas de viento y los cambios de temperatura, provocan cambios en la posición y alineado del secundario, por lo que el hexápodo controlado por computadora es capaz de compensar y corregir esos cambios de manera constante para conservar las condiciones geométricas óptimas durante la observación con una resolución de movimiento de unas cuantas micras.

El primer espejo plano que recibe el haz reflejado por el secundario es el espejo terciario, llamado el M3. Está montado en una plataforma movable controlada también por computadora que mantiene al espejo alineado con el eje de la antena, siguiendo el movimiento en elevación. El ángulo que define con el eje óptico de la parábola refleja la radiación hacia uno de los varios instrumentos de observación que se encuentran en un extremo del cuarto. Cambiando el ángulo, refleja la radiación hacia otro de los instrumentos colocados en el extremo opuesto. Las primeras campañas de observación se llevaron a cabo con dos instrumentos y a lo largo de los años se fueron incorporando nuevos instrumentos, fruto de colaboraciones con institutos de varios países: RSR, AzTEC (ya desmontado), VLBI, SEQUOIA, 1.1 mm, B4R, CHARM, MUSCAT y TOLTEC. Para “iluminar” alguno de estos instrumentos, los técnicos montan y desmontan los espejos adicionales llamados “M4” que desvían el haz reflejado por el M3. Dependiendo del instrumento, se pueden llegar a requerir hasta ocho espejos reflectores para guiar el haz hasta la parte donde se encuentran sus detectores.

Figura 8. Espejo secundario y hexápodolistas para ser izados.



Superficie reflectora

Cuando se habla de manera coloquial es común utilizar las palabras “preciso” y “exacto” como si fueran sinónimos. Formalmente, en ingeniería, no lo son, y es muy importante que todos los involucrados en un proyecto entiendan la diferencia entre precisión y exactitud. Cuando se fabrica una superficie parabólica que servirá para como espejo que refleje la radiación recolectada hacia un punto específico llamado punto focal, primero se hace un diseño teórico donde la curvatura de la parábola se determina por medio de una ecuación matemática, de tal forma que para cada valor del radio de la parábola se obtiene un valor de la curvatura. Estos valores son los valores teóricos y son los que se consideran como valores exactos. Cuando la superficie se va fabricando, se miden los valores de curvatura con algún instrumento y se encuentra el error entre el valor medido y el valor teórico. A mayor error, se dice que la exactitud es menor. De hecho, es común establecer la exactitud de una pieza en términos del error aceptable. Cuando se pregunta sobre la precisión, lo que se quiere saber es con cuánto detalle se lleva a cabo la medición, ¿a nivel de centímetros, milímetros o micras? Una característica con la que se mide la precisión es la mínima medición que un instrumento puede realizar, llamada también la resolución del instrumento. Una regla escolar, por ejemplo, tiene una resolución de 1 mm, por lo que se puede decir con toda confianza que las mediciones con una regla tienen una precisión de un milímetro, pero no podemos decir cuál es la exactitud de la regla mientras no la comparemos con una regla “teórica”. A falta de esta regla ideal, lo que se hace en ingeniería es identificar objetos “patrón” que sirvan de referencia para calcular los errores o bien que sirvan para calibrar los instrumentos de medición y así tener confianza en las mediciones que se realizan. El metro patrón puede consistir de una varilla con la longitud exacta y sin marcas o graduaciones. Por tanto, se pueden tener instrumentos muy exactos pero de baja precisión y también instrumentos de mucha precisión, pero inexactos.

La superficie reflectora es la parte más importante de todo telescopio, es la que permite aprovechar la recolección de la luz, en este caso de la radiación milimétrica. El tamaño de la superficie determina la cantidad de radiación que se puede recolectar y en consecuencia la cantidad de información que se puede obtener. En el caso del GTM la superficie reflectora con sus 50 metros de diámetro es de casi 2 000 metros cuadrados, que reciben y concentran las ondas milimétricas en un

foco para formar una imagen detectable por instrumentos especiales. Estas dimensiones lo convierten en el radio telescopio de ondas milimétricas con un plato movable más grande del mundo, lo que es un logro de carácter global.

Construir y mantener ajustada una superficie así es un reto monumental, la imagen formada en el foco a pesar de ser invisible al sentido humano de la vista, es perfectamente detectable con los instrumentos adecuados, con lo que se obtienen datos y se pueden formar mapas que en su caso pueden convertirse en imágenes computarizadas visibles al sentido humano de la vista. Pero como todo sistema óptico el radio telescopio necesita cumplir con las condiciones ópticas para obtener información de alta calidad.

La condición principal para el sistema óptico del telescopio es que toda la superficie de más de 2 000 metros cuadrados forme una parábola de revolución con una exactitud que depende de la longitud de onda de la luz o radiación que se quiere coleccionar. Idealmente, la superficie parabólica debe tener un error de sólo una vigésima parte de la longitud de onda de la radiación. En el caso del GTM la longitud de onda, representada por la letra griega Lambda λ , que se pretende observar está en el rango de 1 a 4 milímetros, por lo que el error ideal en toda la superficie tiene que ser $\lambda/20$ esto es $1 \text{ mm}/20 = 0.050 \text{ mm}$ ó 50 micras. Así que hay que imaginarse lo que significa producir una superficie de casi 2 000 metros cuadrados que en ninguno de sus puntos se salga de la forma parabólica por una cantidad mayor a 50 micras (un cabello humano promedio tiene unas 60 micras de diámetro). Dado que una superficie con calidad $\lambda/10$ se considera aceptable, se estableció que la meta del GTM sería obtener una superficie con una calidad entre 50 y 100 micras. Una superficie con estas características no puede fabricarse de una sola pieza, tiene que ser formada de secciones o paneles formando un gran mosaico donde todos y cada uno de sus paneles cumplan la especificación y el conjunto entero también lo haga. Pero si generar una superficie de tal precisión y tamaño es muy complicado, mantenerla constantemente a esa precisión lo es aún más. La antena del telescopio es un elemento que además de ser móvil está sujeto a fuerzas como la de la gravedad, la carga de vientos y las deformaciones por cambios de temperatura así que la superficie tiene que ser adaptativa, es decir, debe corregirse constantemente, por lo que la superficie debe contar con dos mecanismos de corrección: un mecanismo estático y un mecanismo dinámico.

En su momento se consideró una superficie compuesta de elementos hexagonales, similar a la utilizada en el telescopio Keck, en Hawaí, pero finalmente se decidió por paneles trapezoidales. En un principio el diseño alemán indicaba la instalación de paneles de aluminio, pero el cálculo de su peso resultó ser demasiado grande. Para aligerar el peso se pensó en usar mono paneles de fibra de carbono, y se llegaron a producir algunos prototipos. En el ínterin la tecnología del electroformado se desarrolló lo suficiente y surgieron los paneles de níquel electroformado que se pueden producir bastante rápido a partir de moldes muy precisos depositando electrolíticamente una capa de níquel muy uniforme y recubriéndolos después con una capa extra de rodio, lo que disminuye su absorción del calor y por ende la deformación térmica. Aprovechando que los telescopios del observatorio ALMA estaban consiguiendo ese tipo de estructuras con 20 micras de error utilizando este proceso de fabricación por electroformado sobre un núcleo de panal de abeja de aluminio, se contrató a la misma compañía fabricante. Sin embargo, no se podían fabricar en las grandes dimensiones que el GTM requería, por lo que se decidió que cada segmento fuera formado por ocho paneles de dimensiones más pequeñas y fáciles de fabricar. Cada segmento es similar a una rebanada de pizza pero sin punta, al colocarse 12 segmentos uno al lado de otro, forman el primer anillo de la superficie parabólica con un hueco al centro (el ápex). El segundo anillo consta de 24, y el tercer, cuarto y quinto anillo constan de 48 para un total de 180. Cada segmento está cuidadosamente colocado sobre una base muy rígida de aluminio, en donde cada panel está sujeto por medio de 5 postes cuya altura se ajusta según el lugar que el panel ocupa en la curvatura de la parábola. Estos postes constituyen el ajuste estático, es decir, se ajustan en la posición correcta durante su ensamble en el laboratorio y se reajustan en sitio antes de ser montados en el telescopio bajo las condiciones reales de operación, con la idea de no volverse a ajustar en un largo período de tiempo.

La medición de cada segmento fue prevista con tiempo para lo que se construyó un laboratorio de superficies esféricas con una enorme máquina de medición por coordenadas situada en las instalaciones del INAOE en Tonantzintla. El laboratorio cuenta con temperatura controlada y cimientos antivibración de doble etapa para reducir los errores causados por los gradientes de temperatura y hasta por el caminar de los técnicos operadores de la máquina de medición. En este laboratorio se ensamblaron y midieron los 180 segmentos que forman la superficie total de

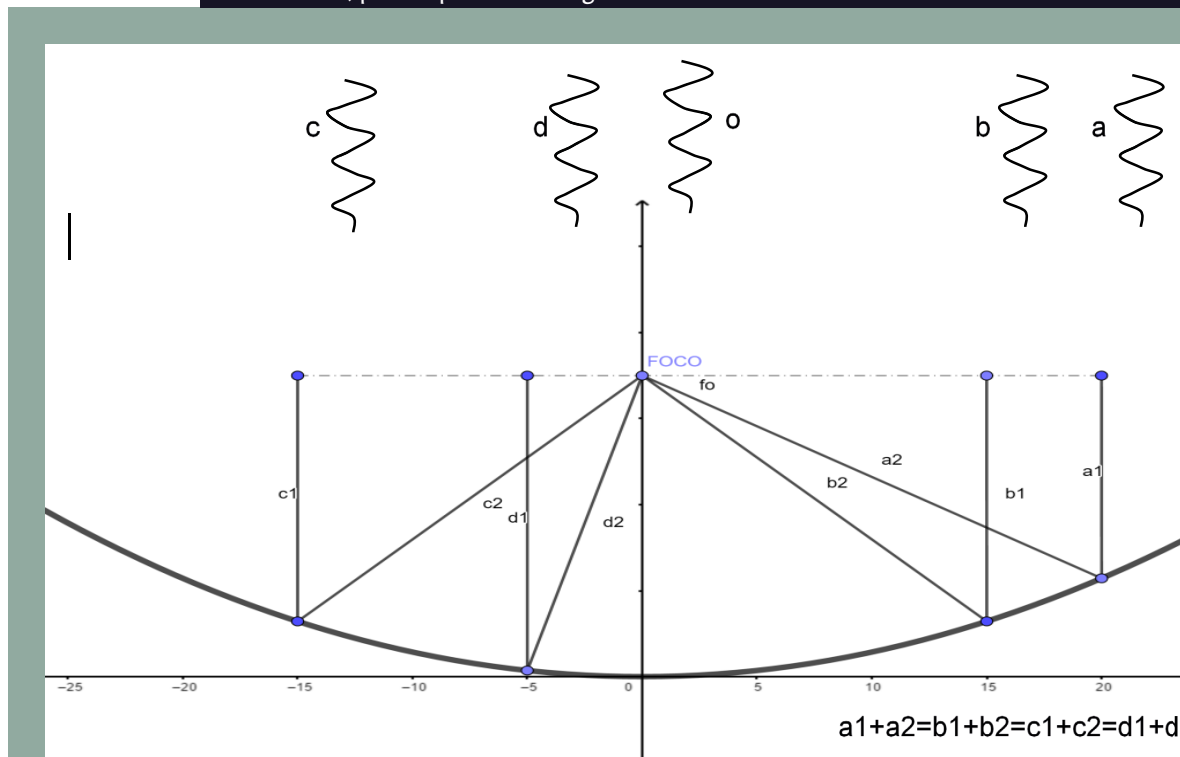
la antena, ajustando y midiendo cada uno de ellos y sus respectivos paneles para montarlos en sus estructuras y formar cada uno de los segmentos.

Una vez ensamblado cada segmento en el laboratorio debía ser transportado al sitio en la montaña. Las dimensiones de algunos paneles sobrepasaban las permitidas para circular por las carreteras y autopistas, por tanto se necesitaron soportes especiales para colocar los paneles en el vehículo de transporte de manera que cumpliera con las dimensiones permitidas. Además, el sólo hecho de transportar un panel de tan alta precisión por las carreteras y autopistas y luego por los caminos rurales hasta la cima de la montaña implicaba un gran reto. Para esta tarea se desarrolló un camión con una suspensión muy especializada, que protegía al máximo el panel de las irregularidades del camino. La velocidad del transporte debía ser muy lenta, cada panel podría tardar hasta doce horas en recorrer su camino hasta el telescopio. A pesar de todas estas precauciones, el transporte provocaba desajustes a los paneles, por lo que, al llegar al sitio debían ser medidos y rectificadas nuevamente. Esta tarea implicó el tener que duplicar toda la logística e instrumentación del laboratorio de superficies esféricas en la montaña. Una vez reajustados, los segmentos debían izarse a su posición específica en la antena. Estando la antena a una gran altura, la izada de cada segmento se hizo con una grúa torre instalada a un lado del telescopio. Un equipo de técnicos especializados fueron montando cada segmento con su estructura sobre la antena por medio de los actuadores electromecánicos. Mientras que otro equipo desde el centro de la antena iba verificando la correcta alineación de cada panel usando instrumentos ópticos de gran precisión como estaciones totales y trazadores láser. Como la medición se hace al aire libre, fue entonces necesario programar todas las actividades de metrología durante la madrugada, cuando la temperatura de la superficie es uniforme, así que el personal trabajaba a grandes alturas, sobre superficie resbalosa, inclinada y a temperaturas por debajo de cero.

Esta medición asegura que cada segmento ocupa su posición local, pero ¿cómo medir la exactitud global de la parábola formada por todos los segmentos montados en la antena? Los instrumentos de medición disponibles en su momento no eran capaces de mantener la exactitud de la medición a tantos metros o no eran capaces de ofrecer la resolución necesaria de apenas unas micras. Para realizar la medición en la parábola se desarrolló un método conocido como “holografía”, que se basa en la forma en que las ondas se comportan cuando se reflejan sobre alguna

superficie. Si dos ondas idénticas viajan exactamente la misma distancia al reflejarse sobre una superficie seguirán siendo idénticas, pero si una de ellas viaja una distancia más corta o más larga, dejarán de ser idénticas después de reflejarse: una se verá adelantada o atrasada con respecto a la otra. Esto se conoce como “desfasamiento”. Se desarrolló una técnica e instrumentación que podía recibir la señal de algún satélite que transmite una onda de longitud conocida, fija y muy precisa, y que al mismo tiempo podía recibir la onda reflejada en la superficie del telescopio. Como la superficie es una parábola, todas las ondas que se reflejen deberán recorrer exactamente la misma distancia hasta el foco de la parábola como se muestra en la Figura 9. Así que comparando la onda original que viene directamente del satélite contra las ondas que se reflejan desde la superficie es posible determinar si se reflejan en fase o desfasadas debido a una imperfección en la superficie. La técnica fue exitosa y permitió llevar a cabo varias campañas de observación científica desde que el telescopio vio su primera luz y hasta 2017, mientras el telescopio funcionaba con sólo tres anillos que cubrían 32 metros de diámetro. Alineando la superficie a diferentes posiciones de elevación de la antena fue también posible determinar cómo la superficie se deforma por efectos de la gravedad a diferentes elevaciones y entonces programar los actuadores electromecánicos para mover los segmentos y contrarrestar esas deformaciones.

Figura 9. Las ondas *a*, *b*, *c*, *d* que se reflejan en la parábola recorren la misma distancia hacia el foco, por lo que deben llegar en fase. La onda *o* sirve como referencia.



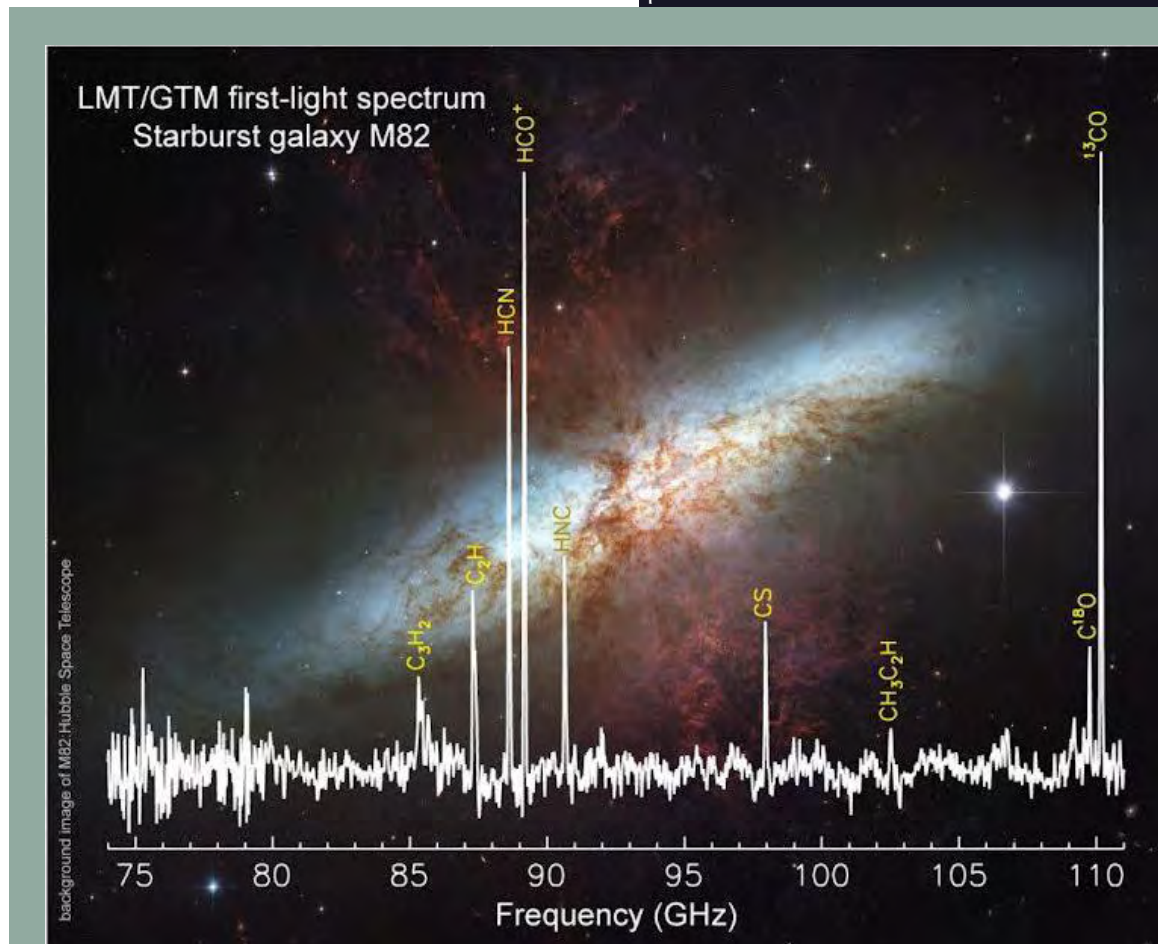
Antes de que se completaran los cinco anillos, es decir, 50 metros, quedó claro que no se podría utilizar la técnica de holografía sin un cambio radical en la estructura de la instrumentación que llevaría mucho tiempo, así que se cambió a otra técnica de medición, conocida como “fotogrametría”, que consiste en tomar múltiples fotografías con una cámara especial que registra las posiciones de un conjunto de estampillas reflectoras cuidadosamente colocadas en la superficie. Un programa de cómputo reconstruye la superficie a partir de las imágenes y determina la forma de la superficie con resolución de unas cuantas micras. Esta nueva técnica probó tener varias ventajas sobre la técnica de holografía. Entre ellas que se puede aplicar para cualquier posición de elevación mientras que la holografía sólo se puede aplicar en posiciones de elevación donde se encuentre un satélite trabajando a la frecuencia del receptor de holografía, y que se puede utilizar el mismo instrumento para diferentes tipos y tamaños de superficies. De hecho, el mismo equipo de fotogrametría se utilizó para verificar la superficie del espejo secundario de 2.5 metros de diámetro.

Etapas de construcción de la superficie

La primera etapa en la que se exploraron materiales, formas, estructuras de soporte, empresas especializadas y procesos de fabricación de los segmentos de la superficie de la antena, culminó con la colocación de los primeros tres anillos para conformar una superficie parabólica de 32 metros de diámetro. Con los sistemas de control de movimiento funcionando ya era posible apuntar al cielo y empezar a verificar que esta estructura de miles de toneladas podía en realidad funcionar como un radiotelescopio. Se llevó a cabo la campaña de la “primera luz” en 2011. El objetivo era poner a funcionar todos los sistemas de manera coordinada, el de movimiento de la antena, los actuadores de la superficie parabólica, el robot hexápodo del espejo secundario, el posicionador del espejo terciario, el instrumento de observación RSR (*red-shift search receiver*) y la computadora de control que hace que todos los sistemas se comporten como un radiotelescopio para poder captar una señal de un objeto celeste. Se eligió a la Galaxia M82 que se encuentra aproximadamente a 12 millones de años luz. La señal esperada se pudo captar el 1 de junio. En la Figura 10 se muestra la gráfica de la señal generada por el RSR superpuesta a una imagen de la Galaxia M82. En la gráfica se aprecia, en la parte inferior, una franja de valores de

más o menos la misma amplitud que se extiende a lo largo de todo el eje horizontal, esto es conocido como el ruido, pero en varios puntos se observan “picos” de amplitud muy superior que sobresalen de esa banda; a esos picos se les reconoce como valores de señal. Mientras más grande sea el valor de la señal respecto al máximo valor del ruido, se dice que la observación o desempeño del telescopio es de mayor calidad. En este instrumento, RSR, los picos representan la detección de determinados elementos químicos en el objeto observado, en particular, en la gráfica de M82 se aprecia la detección de ciclopropenilideno (C_3H_2), etinil (C_2H), cianuro de hidrógeno (HCN), y otros que son de interés tanto para la astronomía como para la química, y más recientemente, la bio astrofísica.

Figura 10. Señal captada de la Galaxia M82 por el GTM usando el instrumento RSR.



Este fue un hito muy importante en la historia del Gran Telescopio Milimétrico. Obtener esa gráfica significó que finalmente, diecisiete años tras haber firmado el Memorando de Entendimiento, después de tantas dificultades técnicas, de mucho batallar para asegurarse de fondos suficientes, de muchas críticas fatalistas de aves de mal agüero, se podía decir que había un radiotelescopio en la cima del Tliltépetl. Pero hubo que bregar para hacer entender, principalmente a las entidades financieras y luego a algunos medios de comunicación, que no se trataba del final sino del principio. Las observaciones astronómicas subsecuentes sirvieron para medir el desempeño tanto de los sistemas mecánicos de movimiento, de corrección de los espejos, de la electrónica de control, etc. Los resultados indicaban que la superficie no estaba alineada con la exactitud esperada y que, adicionalmente, la alineación de los paneles que conforman un segmento se degradaba con el tiempo. El sistema de control del hexápodo producía alarmas de error de manera intermitente y algunos actuadores dejaban de funcionar de manera momentánea y aleatoria.

Se acordó llevar a cabo una revisión exhaustiva de todos los sistemas, entre 2011 y 2012, pero de tal forma que se pudieran llevar a cabo observaciones astronómicas. El plan era ambicioso pero se lograron emitir convocatorias de observación “de riesgo compartido” en la que participaron astrónomos de varias partes del mundo.

Tras varias pruebas en sitio y laboratorio se encuentran las causas de la degradación en la alineación de los paneles y se inicia una etapa de desmontaje, reparación y realineación de los tres anillos, enfocándose en los segmentos más dañados. Se establecieron procedimientos de enfoque y apuntado que, aunque restaban tiempo de observación, resultaron ser fundamentales para monitorear la calidad de la superficie y determinar los algoritmos de corrección que corregirían automáticamente las deformaciones debidas a la gravedad para diferentes posiciones de la antena.

A finales de 2013 se presentó el llamado “Plan de Terminación del GTM” a un grupo internacional de expertos en radiotelescopios. Este grupo de expertos aprobó el Plan y se presentó al Conacyt en 2014 con la finalidad de asegurar los fondos necesarios. Se acordó, entre otras cosas, que los segmentos faltantes en los anillos cuatro y cinco para alcanzar los 50 metros de diámetro de la parábola debían fabricarse con la misma tecnología y compañía que había fabricado los primeros tres anillos. Así se inició la fabricación de los paneles faltantes junto con la fabricación

de todos los demás elementos mecánicos que componen la estructura tubular isostática, la placa base, los ajustadores, las uniones esféricas, es decir, casi 2500 piezas por segmento.

La última etapa de ensamble de la superficie duró dos años, entre 2016 y 2018. De hecho, el último segmento se alineó en el sótano del Telescopio y se instaló en el anillo 5 en diciembre de 2017, unos días antes de iniciar el período vacacional, pero fue hasta febrero de 2018, con la instalación de todos los actuadores electro-mecánicos, que se pudo declarar que la antena, como una superficie segmentada y con corrección automática, estaba completa. Al momento de escribir estas líneas, se ha logrado alinear la superficie interior correspondiente a 32 metros del reflector primario con una calidad de 70 micras y considerando toda la superficie de 50 metros se ha alcanzado una calidad global cercana a las 100 micras.

Los actuadores

El llamado ajuste dinámico de todo un segmento es realizado de manera automática por un conjunto de cuatro actuadores lineales electromecánicos que, básicamente, son émbolos motorizados de movimiento muy fino. Con un control por medio de computadora, cada émbolo es capaz de ajustar su altura en incrementos de 1 micra. Con cuatro actuadores en cada esquina de la estructura que soporta a un segmento es posible ajustar la altura del segmento con respecto a su segmento vecino y también su orientación. Durante la fase de diseño final se discutieron las diferentes tecnologías disponibles para poder controlar esta red de 720 actuadores de una manera confiable. Desde el punto de vista mecánico se tenía que considerar el enorme peso de cada segmento (casi media tonelada), la alta resolución de movimiento y la absoluta exigencia de que el mecanismo debía tener CERO holgura o juego mecánico denominado *backlash*. Desde el punto de vista electrónico, los actuadores debían tener la capacidad de corregir de manera automática la posición comandada por una computadora y además tener capacidad de reportar su estado de funcionamiento. La primera generación de actuadores combinaba un tornillo de tuerca viajera que movía una palanca conectada a un émbolo y utilizaba un sensor lineal que era leído por un circuito de control para conocer la posición del émbolo de manera directa y corregir la posición de manera automática. Se consideró un

protocolo industrial de comunicación entre los actuadores y una computadora dedicada. La totalidad de actuadores se dividió en un conjunto de subredes conectadas a nodos y puertos de comunicación (*gateways*) independientes de tal manera que, si algo salía mal en alguna subred, las demás no se verían afectadas y la superficie de la parábola se podría seguir monitoreando y corrigiendo de manera parcial. En la segunda generación se tuvieron que hacer ajustes a la estructura mecánica y se substituyó el motor eléctrico por un motor con engranajes reductores de mayor eficiencia y torque. La estructura mecánica no era suficientemente rígida y sufría deformaciones notables. El diseño de la carcasa no fue eficiente para aislar el mecanismo y la electrónica, así que se probaron varias opciones hasta llegar a una carcasa de aluminio de una sola pieza con una brida maquinada en donde se instaló un sello de hule.

En la revisión posterior a la primera luz se presentaron problemas de comunicación con los actuadores que llevaban a comportamientos inesperados. Entre los técnicos que llevaron a cabo la revisión se empezaron a manejar los nombre clave “trabados”, “run-aways” (en fuga) y “perdidos”, para referirse a actuadores que se reportaban sin problemas con la computadora pero no se movían, a actuadores que sin razón aparente se movían más allá de la posición comandada hasta llegar a su máxima extensión o contracción, y a actuadores que no establecían comunicación con la computadora. El diagnóstico mecánico fue que la configuración de tuerca viajera y palanca tenía demasiadas partes móviles en su ruta de carga, la precarga sobre la tuerca viajera no era suficiente para evitar el juego mecánico y el tornillo no estaba ya instaladas apropiadamente para recibir la precarga. En cuanto a la parte electrónica se concluyó que el circuito de control y comunicación tenían problemas de diseño que no podrían corregirse mediante programación o con electrónica adicional. Se decidió entonces adecuar la estructura mecánica y substituir la electrónica de monitoreo y control con un protocolo y configuración diferente. Pero se dejó claro al comité de evaluación de expertos internacional que éste sería un sistema “interino” porque las pruebas de vida que se realizaron a la tuerca viajera indicaban una vida útil de menos de diez años. El comité recomendó que se buscara a una compañía con experiencia en la fabricación de actuadores lineales de alta precisión y se instalara el sistema “interino” en los anillos que conformaban la superficie de 32 metros.

Se desmontaron todos los actuadores de la antena, el cableado de comunicación, los nodos, los *gateways* y la computadora de control y se fabricaron e instalaron unos soportes con ajuste manual para mantener los segmentos alineados en una posición fija de tal modo que se pudiera utilizar el telescopio mientras se llevaban a cabo las modificaciones. En lo mecánico, se modificó el resorte de precarga, se cambió el lubricante en la tuerca viajera, se agregó un balero radial y uno axial para sujetar el tornillo eliminando juego en ambos ejes, se modificó la estructura de soporte del sensor lineal que reportaba la posición del émbolo y se rediseñaron las articulaciones móviles de las palancas. En cuanto al control se tomó la decisión de eliminar toda la electrónica y basar el sistema “interino” en componentes comerciales de uso industrial y concentrar la electrónica de potencia para cuatro actuadores en una caja “nodo”. La lectura de posición del émbolo, los switches límite y las señales de activación del motor de cuatro actuadores, se realizó con módulos que se comunicaban con otros módulos en otras cajas nodo mediante un protocolo inmune al ruido eléctrico, llamado EtherCat. Un conjunto de cajas nodo se enlazan para formar una subred. Al inicio de cada subred se instaló una caja “control” en donde se encuentra un controlador lógico programable (PLC) que es el responsable de identificar y controlar la posición de cada actuador conectado a cada nodo. La caja de control de cada subred se conecta a un switch de red Ethernet y un sólo cable sale del switch hacia la computadora de control que se encuentra en el nivel veinte. Para probar su funcionamiento, se crearon mecanismos que recreaban las condiciones de carga y se hicieron funcionar los actuadores en ciclos de ida y vuelta las 24 horas del día. También se instalaron actuadores en la estructura de la antena con sus cajas de control para someterlas a las temperaturas extremas y se arrojaban chorros de agua para forzar ciclos de congelación/descongelación. Las modificaciones mecánicas y electrónicas cumplieron con las expectativas, se eliminó el juego mecánico y se pudo determinar que la precisión y exactitud de los actuadores está determinado por la ecuación que se utiliza para interpretar la posición del sensor lineal colocado en el émbolo. Este sistema ha mantenido alineados los 32 metros interiores del GTM desde principios de 2014.

Los actuadores para los anillos exteriores, 4 y 5, fueron fabricados por la empresa Italiana ADS que decidió eliminar la palanca utilizada en los actuadores interinos y utilizar un tornillo viajero en lugar de una tuerca viajera. Para la precarga decidió utilizar una tuerca precargada. Prácticamente se trata de dos tuercas que presionan

un resorte entre ellas. Estas modificaciones conceptuales le permitieron reducir considerablemente el tamaño del actuador para poder ser instalados en el anillo cinco, donde el espacio entre las bases de los segmentos y la estructura de soporte de la antena es tan reducido que los actuadores interinos no caben. También decidieron utilizar un motor de pasos con engranajes reductores, en lugar de un motor de corriente directa. Esto les permitió utilizar una tarjeta de control que tiene la capacidad de leer un decodificador de posición angular y la capacidad de comunicarse con otros dispositivos utilizando un protocolo de amplio uso en la industria automotriz conocido como CAN. Con este protocolo es posible establecer redes muy amplias, pero se tomó la decisión de usar sólo 8 actuadores por subred. Cada subred está monitoreada por una pequeña computadora que maneja tanto el protocolo Ethernet como el protocolo CAN. Las pequeñas computadoras se conectan a un switch Ethernet y de este switch sale un cable hacia la computadora de control. De esta manera, aunque la red de actuadores interinos es muy diferente en su mecánica y en su configuración de subred a la mecánica y configuración de subred de los anillos exteriores, para la computadora de control del Telescopio el monitoreo y control es básicamente el mismo. Se pudo comprobar que este actuador, al tener menos piezas móviles, es muy robusto y aunque la lectura de la posición no se hace de manera directa con un sensor lineal sino con un sensor angular, es más fácil de determinar y su exactitud está determinada principalmente por la calidad del maquinado de la cuerda del tornillo y la precarga de la tuerca partida. El último actuador para el último segmento de anillo 5 fue instalado y todo el sistema de corrección de la superficie de la antena de 50 metros se declaró funcional el 14 de febrero de 2018.

Instrumentos de observación

Los instrumentos son los ojos artificiales del radiotelescopio que sustituyen al astrónomo de los telescopios ópticos tradicionales. Estos instrumentos toman la radiación colectada por la antena parabólica y reflejada por los múltiples espejos y la convierten en información útil. Entre los instrumentos comunes para radiotelescopios están los espectrógrafos y las cámaras. El GTM tiene tres espectrógrafos desarrollados por la Universidad de Massachusetts: RSR, SEQUOIA y MSIP 1 mm; y uno desarrollado por el Observatorio Astronómico Nacional de Japón:

B4R; y tuvo por muchos años la cámara AzTEC, también desarrollado por la U de Massachusetts ahora en retiro, para dar lugar a las cámaras TOLTEC y MUSCAT, que han sido instaladas recientemente.

La radiación que llega a la Tierra es producida por diferentes fenómenos físicos y químicos. Como se sabe, gracias a Newton, la luz que se recibe del Sol está compuesta por todos los colores además de radiación infrarroja y ultravioleta, entre otras. También se sabe que la radiación no visible está compuesta de varias, y cada una tiene su origen en fenómenos químicos o físicos diferentes. Los espectrógrafos son utilizados para descomponer la radiación recibida en sus diferentes componentes y así saber cuánta radiación de tal o cual frecuencia se recibe del objeto observado, entonces hace posible conocer qué fenómenos se están presentando en los objetos celestes que se observan. Los científicos han podido relacionar la frecuencia de la radiación con la composición química del objeto observado, su temperatura, densidad y masa, inclusive, es posible deducir la velocidad con la que el objeto se mueve y si se “acerca” o se “aleja” desde el punto de vista de la Tierra. Por su parte, las cámaras se utilizan para formar imágenes de los objetos a partir de la radiación emitida de alguna frecuencia en particular. Similar a las cámaras fotográficas que captan la luz visible al ojo humano las cámaras de los radiotelescopios se componen de un arreglo de muchos detectores que son sensibles a la radiación invisible. Con la comercialización en masa de las cámaras digitales se popularizó el término “pixel” para referirse precisamente a cada uno de los sensores responsables de detectar la luz, y hoy en día es común encontrar cámaras con millones de píxeles en los teléfonos celulares y es de todos sabido que más píxeles significa mayor calidad o mejor definición de la imagen. Con la tecnología disponible para fabricar píxeles para cámaras de radiotelescopios todavía no es posible agrupar millones en una cámara pues la radiación de la luz visible se comporta de manera diferente a la radiación de la luz invisible y por tanto no es posible utilizar el mismo tipo de detectores. De manera general, mientras más alta es la frecuencia de la radiación (más pequeña la longitud de onda) más energía tiene. La longitud de onda de la luz visible es del orden de nanómetros, (la mil millonésima de un metro) y la longitud de onda de la radiación que se capta en el GTM es de milímetros (milésima de un metro) por lo que se puede asegurar que la luz visible tiene un millón de veces más energía que la radiación milimétrica. Los sensores de las cámaras comunes no pueden detectar esta radiación tan débil y se hace necesario desarrollar métodos y dispositivos

muy ingeniosos. Merecen mención especial dos cámaras que se han desarrollado para el GTM que ya están instaladas: MUSCAT y TOLTEC. Estos dos instrumentos incorporan detectores que usan la tecnología más avanzada del momento: los superconductores. En estos superconductores, la radiación de longitud milimétrica tiene suficiente energía como para producir un cambio sustancial en sus propiedades eléctricas, particularmente, en una propiedad llamada “inductancia cinética” y además es posible fabricar el superconductor para que reaccione a la radiación de cierta longitud de onda. La enorme ventaja sobre tecnologías anteriores es que se pueden fabricar en tamaños muy pequeños utilizando la tecnología con la que se hacen circuitos integrados. En comparación, la cámara Aztec tenía 144 píxeles, el MUSCAT tiene 1 458 y TOLTEC tiene 7 718. Otra enorme ventaja respecto a las tecnologías anteriores es que los detectores no producen ninguna variación a menos que les incida radiación, es decir, no producen ruido por sí mismos, así que se espera que estas nuevas cámaras produzcan imágenes con una calidad nunca antes vista.

CAPÍTULO VI

BENEFICIOS SOCIALES

Desde el primer día después de la elección del sitio en la cumbre del volcán Sierra Negra o Tliltépetl, y desde las primeras expediciones del personal hacia la cima, la población aledaña comenzó a sentirse extrañada, curiosa y de alguna manera invadida, siendo esta actitud por supuesto normal, pues no habían visto tanta gente pasar por sus comunidades con tanta frecuencia ni con tanto equipo, y sobre todo personas extranjeras. La actitud de la población era muy natural, por la curiosidad de saber qué sucedía y sobre todo por el temor de ver afectadas sus propiedades y modo de vida. Los habitantes estaban acostumbrados a ver pasar a los alpinistas de México y varias partes del mundo dirigiéndose a conquistar la cima del Pico de Orizaba y el Tliltépetl, pero estas expediciones habían sido siempre reducidas y sujetas a las temporadas de ascenso de los alpinistas. Por otra parte, en alguna proporción se practicaba la tala clandestina en las montañas, lo que alertó a los taladores y los obligó a tomar acciones desde defensivas y en algunos casos agresivas.

Las comunidades cercanas a la montaña por el lado del estado de Puebla son principalmente Atzitzintla y Texmalaquilla; esta última siendo la más alta y cercana a las faldas del Tliltépetl. Estas comunidades basan su economía en la agricultura y la cría de borregos y aves. Los productos más cultivados son el maíz, la zanahoria, el nabo, la papa y la col. Mientras que el pastoreo de borregos se realiza arreando al ganado por las mañanas hacia las partes altas para pastar y regresando por la tarde. Hay un comercio de abarrotes, distribución de productos alimenticios industrializados como dulces y bolsas de comida chatarra y por supuesto de refrescos embotellados y cervezas, distribuidas en transportes de las empresas productoras.

Como todo pueblo Mexicano tienen una o varias iglesias a las que devotamente dedican fiestas y ferias en las fechas específicas de cada santo patrón, adicionales a la celebración de Semana Santa y de la Virgen de Guadalupe, en cuya víspera salen contingentes del pueblo a peregrinar en bicicleta hasta el santuario de la ciudad de México o Puebla. Además se realizan ciertas procesiones en honor de algunos santos mayores. A estas celebraciones hay que sumar los diferentes bailes comunales celebrados entre la población que asiste animosamente a bailar y escuchar estruendosa música en vivo de varios grupos musicales o grabaciones con potentes altavoces.

Durante este tipo de celebraciones la presencia y el tránsito del personal del proyecto GTM es no sólo retrasada, sino que a veces detenida y sobre todo mal vista, un poco más que en los días comunes.

La inquietud de la población por las actividades y el tránsito por sus comunidades llegó al grado de generar ligeras confrontaciones, pues la población se preocupaba por el tráfico pesado y continuo que ponía en riesgo a sus habitantes y a sus rebaños. Lamentablemente, hubo casos de atropellamiento de ganado, lo que agravó aún más la situación. Otro aspecto de inconformidad fue generado por la idea de los pobladores de que les serían reducidos sus suministros de agua potable y el poco flujo de corriente eléctrica.

Estando así la situación desde un principio se estableció un diálogo amigable con los representantes de las comunidades para informarles acerca del proyecto y colaborar con la solución de sus inquietudes y proponiendo mejoras y ayudas para su

comunidad. El proceso de ayuda no pudo ser inmediato, porque no se contaba con recursos para lograrlo tan pronto como se deseaba. Esto llegó a causar cierres en el camino por parte de los pobladores y largas pláticas con sus representantes para lograr la apertura de la circulación. Era muy entendible la inquietud de los pobladores, pero poco a poco se fueron dando los pasos para mejorar las comunidades. Un primer ejemplo fue la construcción de un camino asfaltado entre la comunidad de Atzitzintla hasta la comunidad de Texmalaquilla que ya está situada a tres mil metros sobre el nivel del mar y que no tenía más que un camino rural de tierra, casi imposible de transitar en época de lluvias o deslaves. Gracias al concurso del gobierno del estado de Puebla y a las gestiones realizadas por el INAOE, se pudo construir el camino asfaltado. Algunos kilómetros de Texmalaquilla al Volcán Sierra Negra se adoquinaron, y continúan adoquinándose, lo que ha facilitado el ascenso tanto del personal del telescopio como de los pobladores a sus tierras de cultivo, a los lugares de pastoreo, a comerciantes y proveedores de servicios, igualmente a cientos de alpinistas y personas que realizan turismo de montaña anualmente, como la reunión anual de alpinistas y también a personas interesadas en la ciencia y en la belleza natural del lugar. Es muy difícil llevar visitantes al propio telescopio en la cima de la montaña por razones de seguridad, el extremo frío, la gran altura sobre el nivel del mar y la costosa logística. Sin embargo, el programa de visitas al GTM, que tuvo una duración de más de quince años, fomentó el turismo científico, en el cual más de 3 000 visitantes nacionales e internacionales visitaron periódicamente el GTM, dejando una derrama local a los pobladores no sólo en Atzitzintla sino también en Ciudad Serdán y sus alrededores. Desafortunadamente, la mejora del camino a la montaña también fue aprovechada por los talamontes. Se tramitó la construcción de una caseta de vigilancia y pluma de control de acceso al telescopio desde la cual, en coordinación con las autoridades del gobierno federal SEMARNAT, PROFEPA y CONAFOR se establecieron programas para la construcción de brechas corta fuego y se monitorean los incendios forestales.

Se han llevado a cabo proyectos de investigación forestal con la UMAss referentes a *Pinus hartwegii*, especie endémica de las zonas altas del México, cuya resistencia a gran altura y condiciones extremas lo hace único en reproducción. Pero los estudios no se han quedado ahí: los programas de reforestación en zonas aledañas al volcán Sierra Negra merecen mención especial pues hoy en día ya se pueden ver algunos manchones de vegetación nativa producto de la reforestación de más de

diez o quince años en que se han plantado 400 000 árboles en la montaña con el concurso de la juventud del lugar. Se construyó un reservorio de agua en la parte más alta de Atzitzintla para captar agua del volcán y poder surtirla regularmente al pueblo.

Es curioso saber que en Texmalaquilla, antes del GTM, había un único teléfono situado en la tiendita del pueblo, alimentado con celdas solares desde donde a través de un altavoz se anunciaba a las personas que recibían una llamada para que acudieran a contestar. En su momento se instaló un teléfono satelital y se llevó la corriente eléctrica con sus transformadores. Hoy en día gracias al proyecto, llegó el servicio de telefonía celular y una compañía de telecomunicaciones ya realizó la inversión para llevar infraestructura para comunicación de voz y datos por fibra óptica. Así que se puede decir que la comunidad avanzó del sistema de comunicaciones más precario a estar a la par con la infraestructura de la capital del estado.

Las relaciones con las comunidades siguen siendo cada vez mejores, las actividades de beneficio social han pasado de ser esporádicas, como los programas de capacitación sobre huertos de traspatio, ollas solares, capacitación para trasquilar ovejas y para la producción de diferentes objetos de lana, o la donación de ropa en temporadas de invierno, la donación de libros para la biblioteca o el apoyo a diversos equipos deportivos con uniformes, aditamentos y entrenamiento por parte del arquitecto italiano Filippo Gabrielli, experto entrenador de fútbol que los hizo campeones de la zona mientras estaba trabajando para el proyecto, a constituirse en actividades regulares. Sobre todo en el plano educativo, se comenzó desde la base de las escuelas primarias y luego se tramitó la instalación de una telesecundaria. Durante muchos años se ha apoyado a las escuelas rurales, la mayoría de ellas multigrado, con materiales y ponentes que impartían talleres científicos, charlas, actividades de divulgación para niños y jóvenes de todas las edades, telescopios para realizar observación solar y el domo, proyectos para fortalecer y promover vocaciones científicas en niñas y jóvenes de las comunidades cercanas a GTM.

Los Cuerpos de Paz de los Estados Unidos colaboraron para crear el “Campamento Mariposas”, un programa integral enfocado a las niñas de la comunidad, en el que además de promover las vocaciones científicas, busca que las niñas se conozcan, se valoren y aumenten su autoestima, para promover habilidades de liderazgo, su

pensamiento crítico y creativo, e informar sobre temas de interés y de utilidad, como: la igualdad de género, violencia de género, nutrición, salud reproductiva, entre muchos otros temas que incrementen sus posibilidades de sobresalir en otras actividades además de las tradicionales como madres y esposas. Como parte del programa, niñas de las comunidades de Texmalaquilla y Atzitzintla pasan unos días en el observatorio de Tonantzintla descubriendo la importancia de la ciencia. Pero no sólo eso, algunas fueron invitadas a visitar Nueva York para conocer la capacidad de desarrollo del ser humano y convidarlas a ser parte de la misma. La experiencia de esas jovencitas debió haber cambiado sus vidas para siempre y les dio una visión mucho más amplia de sus posibilidades como seres humanos y mujeres en el mundo. El resultado del Campamento fue tan grande que se ha llevado a cabo once años consecutivos en las comunidades GTM, actualmente bajo el nombre de "Empoderamiento Científico". Se estima que el programa ha influenciado positivamente en más de 400 niñas y sus familias.

El programa de divulgación de la ciencia del INAOE no se restringe ni a la región del GTM ni a la astronomía solamente, sino que abarca muchos otros aspectos de las ciencias y las humanidades. Frecuentemente se efectúan talleres de ciencia en Ciudad Serdán y comunidades aledañas, así como los llamados baños de ciencia sabatinos en los que se dan conferencias y talleres para todo el mundo pero en especial para los niños. Se organizan ferias de lectura y observaciones astronómicas. El personal del GTM siempre participa en la "Noche de las Estrellas", que es un evento a nivel internacional promovido por la embajada de Francia, la Alianza Francesa, el INAOE, UNAM, IPN y otras empresas, donde con frecuencia se colocan telescopios operados por astrónomos, ingenieros y estudiantes para que la gente pueda observar el cielo. Las reacciones de las personas al observar el cielo son muy satisfactorias y variadas, nadie que haya asomado su ojo a un telescopio puede dejar de sentir la sensación de grandeza y emoción que probablemente sintió Galileo al asomarse por primera vez al cielo con un telescopio. Es indudable que estas actividades han inspirado a las nuevas generaciones a estudiar carreras técnicas, de ciencias e ingeniería.

Tal vez el lazo más fuerte que se ha podido construir con la comunidad es que el GTM y el Observatorio de Rayos Gamma HAWC que también está en el volcán Sierra Negra son fuentes de trabajo permanente y formal, sustento de decenas de familias de la región.

CAPÍTULO VII

LOGROS

El filósofo Auguste Comte consideraba en 1844 que siempre habría algún conocimiento imposible de descubrir por el ser humano, y tuvo la mala fortuna de poner como ejemplo la composición química de las estrellas. Afirmó que nunca sería posible conocer la naturaleza de las estrellas ni su composición dado que están tan lejanas que no se podría tomar muestras de ellas, y por lo tanto, nos veríamos imposibilitados de conocer su composición. Pero a sólo tres años de su muerte se descubrió que la composición química de un objeto puede ser determinada conociendo el espectro de la luz que emite, por una técnica conocida como espectroscopía. El hecho de que la descomposición de la luz y el espectro que esta produce traigan consigo tanta información desde tan lejos, y que esta información pueda ser arrancada de la propia luz para su estudio a través del telescopio, parecería ser un regalo divino para el hombre. Experimentalmente se comprobaba una y otra vez la veracidad y precisión de la espectroscopía para analizar los átomos y los compuestos presentes en la tierra como con la luz proveniente de las estrellas, el por qué la naturaleza misma de la luz premiaba

los esfuerzos de la humanidad por conocer el universo con la maravillosa información escondida en los espectros luminosos era algo que no se sabía. La explicación tuvo que buscarse por mucho tiempo y por muchos físicos, y fue necesario esperar hasta que se logró comprender la razón por la que la luz y el espectro eran capaces de traer la tan preciada información consigo. Comprender semejante bondad de la naturaleza requirió del desarrollo de la física cuántica, pero aún sin conocer la razón por la que la luz traía la información fue posible el desarrollo de técnicas y dispositivos para aprovecharla de diversas maneras.

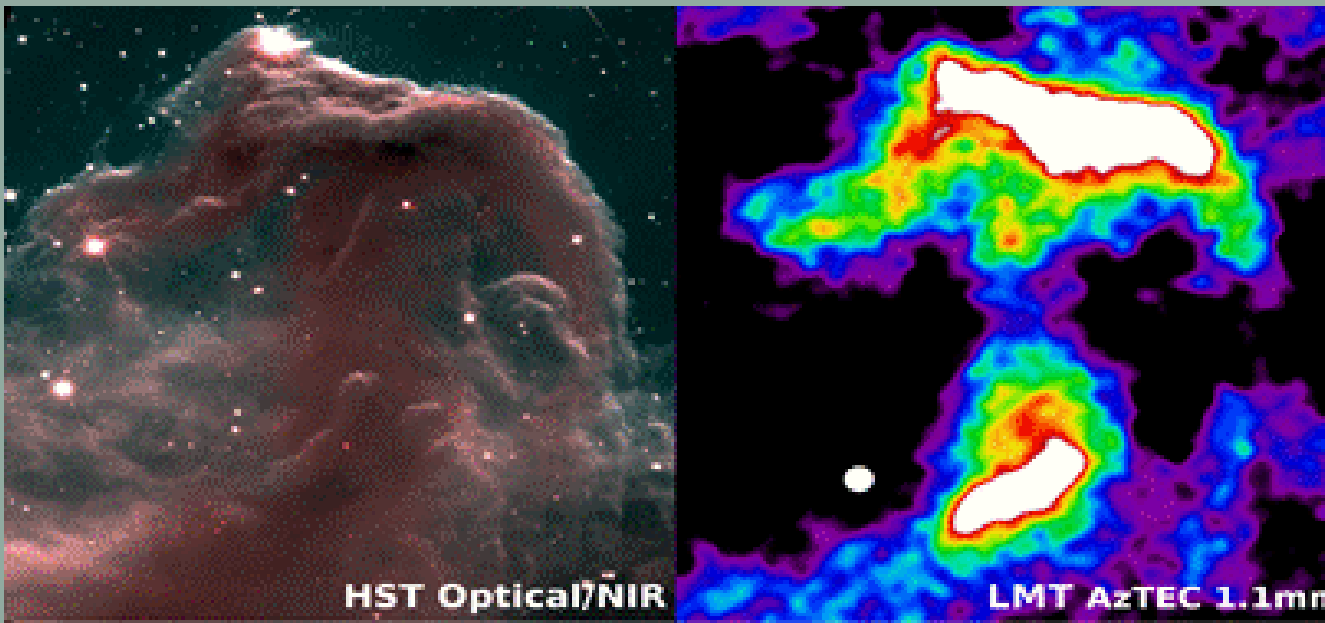
El Gran Telescopio Milimétrico con su enorme antena de recolección, su gran precisión de apuntado y seguimiento, su excelente localización geográfica y altura sobre el nivel del mar, y su magnífico detector *redshift search receiver* puede determinar sin lugar a duda la composición química de las moléculas del espacio exterior ¡y lo hizo desde su primera luz!.

Con la incorporación del instrumento AzTEC la capacidad de observación del GTM aumentó notablemente. Se hicieron las primeras pruebas usando este detector para comprobarlo, y en el primer intento se obtuvo la imagen de la famosa nebulosa “Cabeza de caballo” en la constelación de Orión. Esta nebulosa descubierta a finales del siglo diecinueve por la astrónoma Guillermina Fleming, está a unos 1 400 años luz y es muy famosa por ser completamente oscura (nada de su interior se puede ver en el rango del espectro visible) y tener la forma de una cabeza de caballo. Su emisión en ondas milimétricas fue exitosamente detectada cuando en 2016 se apuntó el GTM en su dirección y con la cámara AzTEC se obtuvo la imagen de lo que sucede en el interior de la famosa nebulosa, complementando así las imágenes del visible y las del infrarrojo. La comparación de las imágenes obtenidas de la nebulosa de la cabeza de caballo en la década de los cincuenta por Guillermo Haro y colaboradores, con las primeras imágenes obtenidas en 2016 con el GTM nos dan una clara idea de la enorme cantidad de información que se puede obtener usando el GTM y sus instrumentos. Las primeras pruebas que arrojaron esta imagen de la nebulosa cabeza de caballo se realizaron cuando el telescopio todavía no tenía toda la superficie reflectora terminada ni alineada a su mejor ajuste, sólo se tenían 32 metros funcionales de diámetro de la superficie, de los 50 metros totales (que se terminarían en diciembre del siguiente año), y aún así la imagen obtenida fue de gran calidad revelando los procesos físicos que suceden en el interior de la

nebulosa y que anteriormente en las imágenes del visible apenas dejaban ver una zona completamente oscura compuesta de gas y polvo a bajas temperaturas.

Es impresionante ver como el GTM puede detectar las emisiones de gas y polvo de bajas temperaturas en una zona antes completamente oscura. El GTM comenzó a ver lo antes nunca visto, tal como Galileo cuando por primera vez apuntó su telescopio al cielo y pudo ver por primera vez cosas nunca antes vistas por el ojo humano. El GTM comenzó a operar científicamente desde entonces y se convocó a la comunidad científica para presentar sus proyectos de investigación usando el GTM. Se recibieron casi 250 propuestas de investigación de diversas índoles para estudiar desde objetos en el sistema solar hasta las galaxias más lejanas procedentes de más de 300 investigadores y 85 instituciones de 27 países, entre ellos México por supuesto.

Figura 11. Comparación de las imágenes obtenidas en el visible con la obtenida en 1.1 mm con el GTM y AzTEC.



El anillo más relevante

Se han llevado a cabo muchas investigaciones exitosas con el GTM que han contribuido notablemente al desarrollo global de la ciencia, pero reportamos algunas de las más importantes, siendo uno de ellos el estudio del anillo de polvo circundando a una estrella vecina del Sol: Epsilon Eridani, que está “apenas “ a unos 10 años luz de distancia del sol, y es un poco más pequeño, menos caliente y más joven. En 1983 se le detectó una emisión en el infrarrojo, lo que despertó el interés por observar con más detalle. Se determinó que las emisiones procedían de un disco de material orbitando a la estrella. Las primeras imágenes submilimétricas de este fenómeno obtenidas con el telescopio James Clark Maxwell de Hawaii mostraban regiones más brillantes en el disco. La imagen obtenida con el GTM y la cámara AzTEC mostró por primera vez el disco o anillo completo y la emisión de Epsilon Eridani, y representa la única detección de emisión estelar con un telescopio de antena simple. Se demostró que el anillo es homogéneo y las zonas de mayor brillo detectadas por telescopios menos sensibles pueden ser producto de objetos más lejanos como galaxias invisibles muy distantes. Actualmente con la nueva instrumentación del GTM se podrán triplicar o hasta cuadruplicar las observaciones y estudios del número de estrellas con características similares, lo que eventualmente conducirá a la detección de planetas extrasolares, un tema que interesa mucho a la comunidad científica y en general al mundo entero. La perspectiva de éxito de los estudios realizados con el GTM y sus nuevos instrumentos es de carácter mundial.

La segunda galaxia más lejana

Dentro de las investigaciones de frontera se destacan los estudios de sistemas estelares muy lejanos. En particular una investigación de las más exitosas fue liderada por Jorge Zavala un joven recién doctorado del INAOE, que observó un objeto extremadamente rojo en la constelación de Hydra, que podría explicar la expansión del universo por el corrimiento al rojo, y también conocer su contenido de gas molecular y polvo. El objeto en cuestión conocido como G09 83808 se creía que estaba a unos 12 mil millones de años luz, esto con los datos obtenidos de las observaciones del Observatorio Espacial Herschel. Pero Zavala usando el GTM y el RSR identificó por las transiciones moleculares que este objeto no sólo es una galaxia muy lejana

sino que en realidad es la segunda galaxia más lejana jamás detectada antes. Esta conclusión causó revuelo y fue verificada por varios observatorios alrededor del mundo que avalaron las conclusiones obtenidas en el GTM. El resultado fue publicado por la prestigiosa revista *Nature Astronomy* a finales de 2017, demostrando las capacidades del GTM en el estudio del universo temprano, y por supuesto el potencial del trabajo conjunto global de las grandes instalaciones astronómicas. El éxito de esta investigación tuvo resonancia a todos niveles y el GTM se posicionó entre los observatorios más importantes en todo el mundo para este tipo de estudios,

El telescopio HAWC

Con la logística y las facilidades instaladas en la montaña para el GTM, el sitio se convirtió en un lugar muy atractivo para la instalación de otros proyectos astronómicos y meteorológicos, ya que se contaba con el camino de acceso y el suministro de energía eléctrica. Surgieron las posibilidades aprovechar las condiciones establecidas y se instalaron en las cercanías una estación meteorológica por parte de la UNAM y la BUAP, así como un dispositivo para detectar la incidencia de neutrinos.

La excelente localización del sitio GTM permitió al INAOE establecer las relaciones internacionales necesarias para establecer un telescopio detector de partículas de alta energía en las cercanías del GTM. Las partículas de alta energía se detectan de la mejor manera en sitios de gran altura, y el sitio del GTM tiene una altura muy buena para este propósito. Fue así que un consorcio de varias universidades mexicanas y extranjeras, encabezadas por la Universidad de Maryland, lanzaron un proyecto para establecer en algún lugar adecuado del mundo, un telescopio detector de partículas de alta energía. El consorcio tenía por entonces un detector similar en el estado de Nuevo México, pero las nuevas tendencias apuntaban a actualizar el sistema e instalarlo en un sitio más adecuado. Para este propósito se tomaron en consideración un par de sitios en Rusia y en China junto con el sitio mexicano de la Sierra Negra. Finalmente las condiciones y facilidades del sitio mexicano superaron a todos los demás sitios propuestos y se decidió instalar el telescopio detector en México y particularmente en un valle a unos 500 metros por debajo del GTM.

El proyecto liderado por la Universidad de Maryland y el INAOE se llamó telescopio HAWC por las siglas en inglés de *High Altitude Water Cherenkov Observatory* diseñado para detectar partículas de muy alta energía de origen cósmico que se producen cuando un rayo gamma colisiona con alguna partícula de la alta atmósfera y produce una serie de reacciones en cascada, de diferentes partículas que llegan a velocidades cercanas a la de la luz.

El HAWC no se parece en nada a un telescopio. Es un conjunto de 300 grandes tanques de agua de 7 metros de diámetro y 5 metros de alto que contienen agua muy pura. En el interior están colocados detectores de luz de efecto Cherenkov con multiplicadores que con gran sensibilidad detectan un destello de luz producido por la partícula de alta energía al pasar por el agua; esto es llamado efecto Cherenkov. Los datos obtenidos permiten rastrear la partícula que dispara el destello de luz para encontrar su primera reacción y así establecer que fue provocada por un rayo gamma y de donde proviene. La energía de las partículas que HAWC detecta son enormes del orden de tera electrón volts.

La instalación de HAWC y de otros instrumentos en la Sierra Negra de Puebla en las cercanías del GTM convierten al sitio en un conglomerado globalizado de investigación Astrofísica de enorme importancia, ya que desde este sitio se pueden hacer investigaciones del más alto nivel abarcando emisiones en un amplio rango de energías. Y es de esperarse que algunos otros instrumentos puedan ser instalados en la Sierra Negra de Puebla.

Figura 12. Vista del *sui géneris* telescopio Hawc desde el GTM.



CAPÍTULO VIII

EVENT HORIZON TELESCOPE O CÓMO VER LO INVISIBLE

La historia del GTM ha sido una de retos técnicos, de arriesgarse a probar los límites de lo posible y de remar a contracorriente. Desafortunadamente, la batalla más difícil no ha sido en el área de la técnica sino en el área administrativa, legal y social. Desde los inicios del proyecto se establecía en el memorando de entendimiento que era necesario que se conformara una entidad legal con la personalidad jurídica necesaria para gestionar y operar el presupuesto de construcción y, posteriormente, de operación del telescopio, reconociendo que la administración pública federal no tiene mecanismos de financiamiento y administración de fondos para mega proyectos científicos de largo plazo y que las leyes que regulan la ciencia y la tecnología no están alineadas con las leyes que regulan el gasto de las entidades públicas. Así pues, los financiamientos, aunque son autorizados por la dependencia dedicada a la ciencia, son regulados por otra dependencia ajena a esa actividad y por tanto sanciona la ejecución bajo criterios que no toleran cambios en los plazos de ejecución o ajustes en las estimaciones presupuestales y termina dictaminando que a los

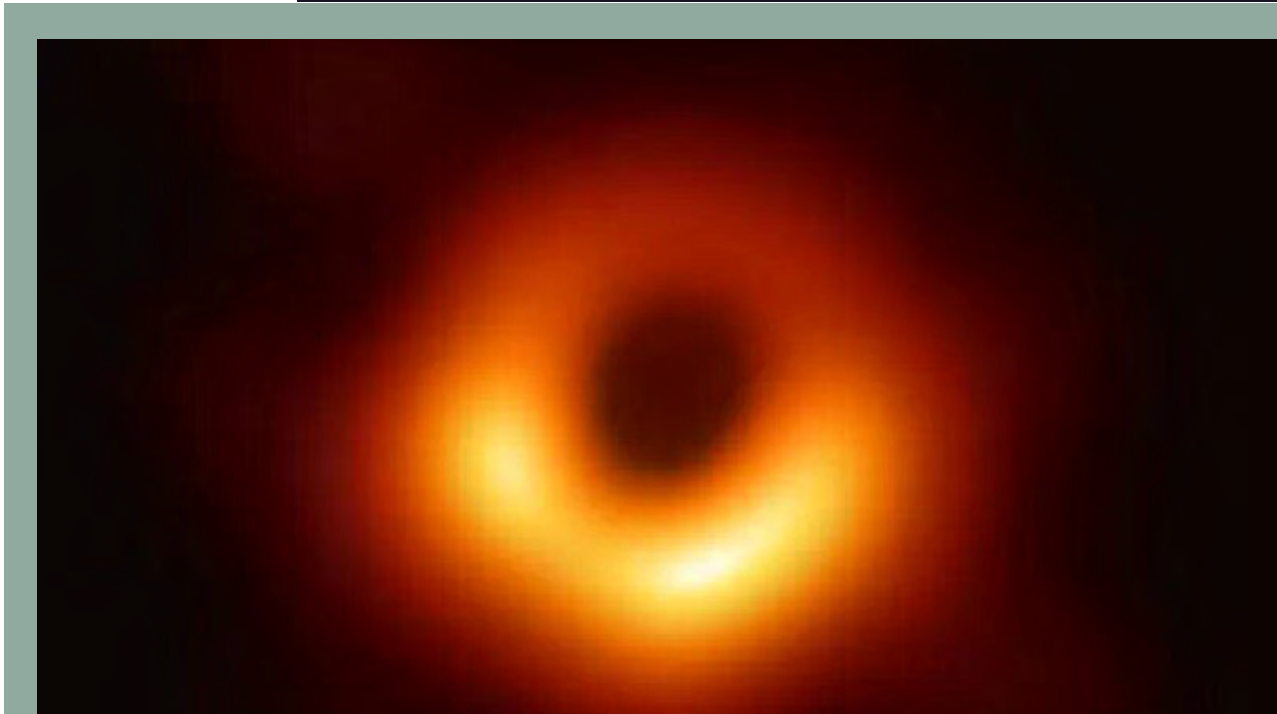
fondos no se les asignaron las “etiquetas” adecuadas o no se nombraron los “rubros” correspondientes. A la falta de presupuestos suficientes, con recortes, con retrasos, con interrupciones, se agregaron las batallas contra la cobertura de la prensa que, en busca de “la nota que vende”, en varias ocasiones publicaron cosas que no se ajustaban a la realidad. Tal vez la nota periodística que más daño hizo al proyecto fue la publicada a nivel nacional, en el horario estelar que ocupaba el noticiero más visto de la televisión, en diciembre de 2012, unos días después que tomara protesta el Presidente Peña Nieto. Como anécdota, un grupo binacional de técnicos que había pasado todo el día en el Telescopio, se encontraba cenando en el restaurante de un hotel en el centro de Ciudad Serdán cuando el dueño sintonizó la televisión en el noticiero, justo cuando el famoso comentarista de noticias anunciaba que, después del corte comercial daría noticias sobre el Gran Telescopio Milimétrico. La desagradable sorpresa para este grupo, los comensales y gran parte del país fue que el presentador empezó diciendo que el Gran Telescopio era un gran fraude, un elefante blanco, un engaño, y presentó imágenes que “comprobaban” el abandono de las instalaciones. Además de sorprendidos, se sintieron desempleados. El noticiero prometió presentar una segunda parte de su “reportaje de investigación” al día siguiente, afortunadamente las autoridades del INAOE y del CONACYT se apresuraron a aclarar la situación del GTM. Emitieron un boletín de prensa que fue leído en el mismo noticiero y ya no se presentó esa segunda parte, pero tampoco se presentó un reportaje con la situación real del Telescopio. El daño a la imagen fue tal que inclusive después de varios años era común encontrarse a varias personas en las pláticas de divulgación que dudaban que el telescopio funcionara y que alguna vez llegara a funcionar pues aquel noticiero sembró la imagen de que estaba hecho de madera y aluminio.

Afortunadamente la oportunidad de dar un contragolpe mediático llegó apenas un año después, gracias a que se mantuvo informada a la comunidad astronómica internacional sobre el verdadero estado del Telescopio mediante publicaciones en congresos especializados y presentaciones en eventos académicos, y a que el interés de la comunidad por un radiotelescopio milimétrico de grandes dimensiones seguía vigente y el GTM era el único en construcción. Los resultados obtenidos hasta entonces llamaron la atención del doctor Sheperd “Shep” Doeleman investigador principal del proyecto “Event Horizon Telescope” (telescopio de horizonte de eventos) que se encontraba conformando un grupo multinacional de radio

telescopios para intentar obtener, por primera vez en la historia, una imagen de un agujero negro, o de manera más precisa, la imagen provocada por un fenómeno que se produce justo en el borde de un agujero negro, conocido como horizonte de eventos, un anillo formado por material que gira alrededor del agujero negro a gran velocidad y emite radiación en el rango de 1 mm. Con lo que el GTM se convirtió en candidato para formar parte del selecto grupo de telescopios que serían parte del experimento.

En su teoría de la relatividad general Albert Einstein predecía que la luz debía curvarse en presencia de la gravedad provocada por un objeto muy masivo. Esta era una predicción radical que cambiaba completamente el entendimiento que hasta el momento se tenía sobre la luz y fue altamente debatida, pero se comprobó experimentalmente durante el eclipse solar de 1919 cuando se pudo observar como la luz de una estrella distante se curvó al pasar cerca del Sol. En consecuencia, un objeto extraordinariamente masivo debería ser capaz de curvar la luz suficientemente para “atraparla” en su campo gravitacional, muy similar a la forma en que la Tierra tiene atrapados a los satélites artificiales haciéndolos orbitar a su alrededor. De hecho, cualquier objeto que no alcance la velocidad mínima de escape (que para la Tierra es de aproximadamente 11 km/segundo) eventualmente caerá en la superficie.

Fig. 13 Esta es la famosa fotografía del agujero negro obtenida por el consorcio de telescopios del proyecto EHT (Event Horizon Telescope), con el GTM al centro del arreglo mundial.



Cincuenta años más tarde se empezó a utilizar el término “agujero negro” para referirse a este tipo de objetos extremadamente masivos que provocarían un campo gravitacional tan enorme que ni siquiera la luz podría escapar; pero los avances en el entendimiento del fenómeno se dieron en el campo teórico. Se pudo establecer que para generar un agujero negro se debía concentrar una masa equivalente a millones de veces la masa del Sol en un diámetro muy pequeño. Se requirieron muchos años de observación y el desarrollo de nuevos telescopios y radiotelescopios para empezar a encontrar evidencias de que los agujeros negros no eran objetos teóricos, sino reales. Como ejemplo, el VLT (*Very Large Telescope*) ha estado observando la trayectoria elíptica en el centro de la Vía Láctea de la estrella S2 por muchos años y la forma en que se comporta hace suponer la existencia de un agujero negro en el centro de la galaxia. El problema es que este agujero negro, de 4 millones de veces la masa del Sol, según los cálculos teóricos, ha de tener un diámetro como el de la órbita de Mercurio. La distancia entre la Tierra y el centro de la Vía Láctea es de más de 25 000 años luz, así que, aunque el horizonte de eventos es más grande que el agujero negro que lo produce, visto desde la Tierra, apenas tiene un diámetro de 20 millonésimas de segundo de arco o, en comparación, 900 millones de veces más pequeño que el diámetro de la Luna. Otro horizonte de eventos que también se ha estimado de similares dimensiones es el de la galaxia M87. El agujero negro que lo produce se considera más masivo, 6000 millones la masa del Sol, pero está considerablemente más lejos, a 53.4 millones de años luz. Así que los elementos teóricos estaban resueltos, se conocía la ubicación exacta de dos candidatos, sus tamaños aparentes en el cielo y hasta había evidencia de su existencia por observaciones indirectas. El problema es que se necesita un telescopio del tamaño de la propia Tierra para intentar observar la sombra de un agujero negro! Está claro que no es posible construir un telescopio de ese tamaño. Sin embargo, es posible emularlo, ¿Cómo? Imaginemos un espejo de telescopio del tamaño de la Tierra que se parte en pedazos más pequeños, y algunos de esos pedazos son recogidos y colocados en sus correspondientes lugares en diferentes partes del mundo. Tendríamos un espejo o superficie reflectora formada por varios de esos pedazos repartidos por el mundo, y mientras la Tierra gira estos pedazos barren una superficie un poco mayor. La integración de todos sus datos, que deben estar perfectamente sincronizados, dará como resultado una imagen con una resolución como la de un telescopio del tamaño de la Tierra. Y esto es precisamente lo que se logra con la técnica de observación conocida como interferometría de base muy larga, o VLBI por sus siglas en Inglés.

Las circunstancias se dieron para que Doeleman visitara el GTM y pudiera constatar de primera mano que el GTM, además de tener una ubicación privilegiada y un tamaño impresionante, era una instalación científica operativa con la capacidad técnica y humana para unirse al proyecto. Doeleman envió, desde el Instituto Tecnológico de Massachusetts (el prestigioso MIT), un reloj atómico para ser integrado a la instrumentación del GTM en abril de 2014. En términos simples, este reloj permite conocer el tiempo con una exactitud tan grande que solamente se desvía un segundo de la hora exacta en un período de 30 millones de años, con una resolución que típicamente alcanza la mil millonésima de segundo. Con este reloj, el GTM ya podría sincronizar sus observaciones con las observaciones que realizan otros telescopios hacia el mismo objeto celeste, en cualquier parte del mundo, por tanto, le daba la posibilidad de aplicar la técnica de VLBI. En principio, con un telescopio en Groenlandia y otro en el Polo Sur se tendría el telescopio equivalente con el diámetro necesario para observar el horizonte de eventos. El GTM, y otros telescopios ubicados más hacia el ecuador darían mayor resolución a la observación.

En mayo de 2014 se hicieron pruebas sincronizando el GTM con 7 radiotelescopios de los 10 que conforman el VLBA, un arreglo de radiotelescopios distribuidos en varias partes de los Estados Unidos. Entonces arrancó una carrera contra el tiempo: en estrecha colaboración con el Observatorio Haystack del Instituto Tecnológico de Massachusetts, el Observatorio Astrofísico Smithsonian, la empresa MERLAB, la Universidad de Massachusetts y el INAOE se modificó un receptor interferométrico en el rango de 1.3 mm. Para incluir nueva óptica de acoplamiento, un nuevo polarizador y un sistema de memoria capaz de almacenar datos a la impresionante rapidez de 16 Giga bits por segundo. En marzo de 2015 se llevó a cabo la primera observación conjunta con los observatorios JCMT (James Clerk Maxwell Telescope) y SMA (Sub Millimeter Array) en Hawaii, CARMA (Combined Array for Research in Millimeter Wave Astronomy) en California, ARO (Arizona Radio Observatory), SMT (Sub Millimeter Telescope) en Arizona y APEX (Atacama Pathfinder Experiment) en Chile. El primer resultado que indicaba que se había llevado a cabo de manera exitosa la observación del centro de nuestra galaxia con el GTM simultáneamente con el JCMT (a 6000 kilómetros de distancia uno del otro) representó un hito fundamental en la historia del telescopio. Ya no quedaba duda que el GTM se encontraba a la altura de otros radiotelescopios de clase mundial, además, era el radiotelescopio más grande de la red.

Las observaciones para el EHT fueron especialmente demandantes pues la solamente se pueden llevar a cabo durante un período de unos cuantos días entre marzo y abril, cuando, por la inclinación de la Tierra, el objetivo es observable tanto para los telescopios en el hemisferio norte como los telescopios en el hemisferio sur, para conformar el telescopio equivalente del tamaño del diámetro de la Tierra. No había lugar para retrasos, no había lugar para fallas, era necesario que todas las piezas funcionaran a la perfección, que toda la logística estuviera en su lugar (el hospedaje, los vehículos, la gasolina para que el equipo binacional subiera y bajara la montaña), que la energía eléctrica no sufriera un súbito apagón, que las condiciones atmosféricas fueran benignas en todos los telescopios, etc. Para las observaciones de 2016 y 2017 se unieron el SPT (South Pole Telescope) en el Polo Sur; IRAM (Instituto de Radio Astronomía Milimétrica) en España; NOEMA (Northern Extended Millimeter Array) en Francia; el GLT (Greenland Telescope) en Groenlandia; y ALMA (Atacama Large Millimeter Array) en Chile. Las observaciones en 2018 tuvieron especial importancia pues se realizaron con el GTM completo, con 50 metros de diámetro, con toda la red de actuadores recién terminada en febrero, con un nuevo interferómetro de base muy larga VLBI de 1mm y la mejor transparencia atmosférica de toda la red (al menos durante una noche), al mismo tiempo que se llevaba a cabo fotogrametría y se realizaban las pruebas de puesta en servicio del espectrómetro SEQUOIA. Por si fuera poco, en esas fechas se integraron los informes técnico y financiero que dieron cuenta, centavo a centavo, de los dineros entregados por el Conacyt en 2016 para llevar al GTM a este nivel de operación, como el más grande, el más sensible y más estable de la red internacional de radio telescopios, y además situado del centro geográfico del arreglo total de todos los telescopios del mundo.

Durante esas campañas de observaciones se generaban unos 350 Terabytes de datos cada noche que se almacenaban en discos duros que se transportaban cuidadosamente desde la cima hasta el INAOE y luego se enviaban a los laboratorios de súper cómputo del Instituto de Radioastronomía Max Planck, en Alemania, y al Observatorio Haystack del MIT, en Estados Unidos, para ser procesados por equipos independientes.

El reconocimiento a toda esta labor llegó a que el 10 de abril de 2019, en conferencias de prensa simultáneas en Ciudad de México, Washington, Santiago de Chile,

Bruselas, Tokio, Taipei y Shangai se reveló al mundo entero la primera imagen de un agujero negro, la imagen que por fin daba evidencia experimental a las predicciones teóricas que Albert Einstein hiciera hace cien años. La imagen estuvo en la primera plana de todos los diarios del mundo, de todos los sitios de noticias en internet, en la página principal de Google y en las redes sociales. La imagen se volvió tendencia, se volvió *meme*, se volvió tema obligado en reuniones familiares y no hubo persona en la Tierra que no hablara del agujero negro y de la teoría de la relatividad. La fotografía del horizonte de eventos se convirtió, probablemente, en el logro científico y tecnológico más importante del siglo veintiuno. Hasta aquel noticiero que en 2012 distorsionara la situación del Telescopio y minimizara la historia de esfuerzos que en este libro se han contado, tuvo que recomponer su postura celebrando apoteósicamente el éxito obtenido. Por este magnífico logro, el Gran Telescopio Milimétrico, como parte del proyecto EHT, recibió el afamado premio internacional 2020 Science Breakthrough, el considerado premio Nobel de la ciencia moderna.

De esta manera el GTM reclamaba para México el lugar que por herencia ancestral le corresponde, haciendo historia en la astronomía mundial para orgullo de todos los mexicanos.

Es así como el estado de Puebla logró tener el radiotelescopio de ondas milimétricas más grande del mundo que se convirtió en el centro de la primera fotografía obtenida de un agujero negro.

CAPÍTULO IX

FUTURO Y CONCLUSIONES

El Gran Telescopio Milimétrico del estado de Puebla se enfrenta a un futuro muy prometedor, junto con el resto de los telescopios de clase mundial que forman el *Event Horizon Telescope*, al que pronto se van a sumar otros telescopios en el mundo con las actualizaciones e instalación de nuevos receptores heterodinos. Su capacidad de observación se va a multiplicar notablemente. En el mundo entero todos los telescopios están mejorando con nuevas y mejores tecnologías y la capacidad de cómputo para procesar los datos obtenidos también avanza a grandes pasos. En la próxima campaña de observación (“new generation EHT”) se planea no sólo obtener una foto de un agujero negro, sino hacer una película que muestre la evolución de los procesos en el agujero negro, habrá más telescopios participantes y eventualmente hasta los telescopios espaciales podrán ser parte del proyecto.

Por otra parte, las líneas de investigación del GTM se amplían con proyectos tales como la detección y descubrimiento de planetas extrasolares y moléculas en el entorno interplanetario.

El INAOE y la Universidad de Massachusetts trabajan conjuntamente en la operación del GTM y se esperan todavía grandes resultados. México, que significa el ombligo de la Luna, es hoy mas que nunca “el ombligo del agujero negro”.

El Telescopio necesita actualizarse cada día y mejorar la alineación de su superficie , fabricar un conjunto de actuadores nuevos para controlar la alineación y así lograr mejores resoluciones ópticas, además requiere de un sistema de ventilación para estabilizar las diferentes temperaturas de todo el conjunto y evitar deformaciones, con lo que se mejorará la imagen y permitirá el uso del telescopio las 24 horas del día..

Es mucho y constante el trabajo y esfuerzo que se requiere, amen de los recursos económicos, pero los resultados, descubrimientos y los logros a nivel mundial que este telescopio puede aportar a la ciencia y al conocimiento humano son verdaderamente invaluable y enorme motivo de orgullo para todo México. El Gran Telescopio Milimétrico del INAOE en el Estado de Puebla mantendrá la tradición astronómica de nuestro país en los niveles más altos como siempre ha estado desde tiempos ancestrales.

Bibliografía

- Arteaga, C. *El Ojo Mágico*, sin publicar, Puebla, 2010.
- Bartolucci, J, *La modernización de la ciencia en México : el caso de los astrónomos*, Plaza y Valdés, México ,2000.
- Hoskin M., *Cambridge Illustrated History of Astronomy*, 1997, Cambridge University Press, Cambridge UK.
- Jefferys W.H,y Robbins Robert R, *Discovering Astronomy*, John Wiley and sons University of Texas. 1997.
- México Desconocido oct. 2016.
- INEGI. Relieve Puebla.
- González M. *HAWC nuevo observatorio de rayos gamma*.
- Mejía, V. A. Quintero O F, Flores M M, García C H, Uribe A L. *Concepción y Neyra elaboración de estructura de concreto a una altura de superior a los 4,000 metros sobre el nivel del mar para el GTM*.
- Jáuregui, Jorge A, *Thiltéptl o Sierra Negra guía de montaña*.
- Takeuichi.N, Flores N ,Franco. *Estrellas y Dioses* 2020.
- Poniatowska Elena *El Universo o Nada* 2013.
- William M I. Carrasco E, Arexaga I editors *The Large Millimeter Telescope Neighbors Explore the Cosmos*. 2005.

Referencias electrónicas

Wikipedia

Bitácora de conferencias.

Página Web del INAOE.

Notas de la presentación “Observing SMBH’s with the LMT- The Event Horizon Telescope”, David Hughes, 2015.

The Toltec camera: An overview of the instrument and in-lab testing results. Grant Wilson et al., Proceedings of SPIE 2020.

MUSCAT: the Mexico-UK Sub-Millimetre Camera for AsTronomy. Thomas L. R. Brien et. Al. SPIE Proceedings Vol 10708, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX, 107080M (9 July 2018); doi: [10.1117/12.2313697](https://doi.org/10.1117/12.2313697).

Design and characterization of the MUSCAT detectors. V. Gomez-Rivera, et al. Proceedings Volume 11453, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X; 114531Q (2020) <https://doi.org/10.1117/12.2576334>.

MUSCAT Focal Plane Verification. M Tapia, et. al. Proceedings Volume 11453, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X; 1145309 (2020) <https://doi.org/10.1117/12.2576219>.

Referencias electrónicas

Wikipedia

www.inaoep.mx/noticias.

[www.lmtgtm.org/telescope/instrumentation/
general-information/?lang=es](http://www.lmtgtm.org/telescope/instrumentation/general-information/?lang=es).

<https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole>.

