



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

“Cooperación internacional entre
México y el Reino Unido para la
creación e implementación del
experimento CHARM en el Gran
Telescopio Milimétrico.”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
DE:

F Í S I C A

P R E S E N T A:

Paulina Carmona Rodríguez

DIRECTORA DE TESIS:

Doctora María de la Paz Ramos Lara

Cd. Mx. 2024



« Por mi raza hablará el espíritu »



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*To my soulmate, Scott.
Para mamá, papá, abu, abuelo, vale e iva.
Para Paulina de 13 años. Lo logramos.*

Agradecimientos.

Como preámbulo me gustaría decir que todos los agradecimientos aquí plasmados, son genuinos y que de ninguna forma se expresan para caer en lo pretencioso. Para mi todas y cada una de las personas mencionadas a continuación, tienen un lugar especial en mi corazón y en mi historia como estudiante de Física. Gracias por todo su valioso apoyo y por compartir conmigo fragmentos de su vida que siempre atesoraré.

Primeramente, gracias a mis padres, porque sin su trabajo, amor, apoyo, comidas, “rides”, llamadas, pláticas profundas, abrazos y besos, jamás hubiera podido crecer llena de privilegios a los que no se les puede poner precio, y que son necesarios para poder estudiar una licenciatura. Gracias por siempre motivarme a estudiar, a experimentar, a ser libre y, sobre todo, por siempre inspirarme a ser mejor persona.

My lovely Scott: thank you for being my biggest support through the last two years this thesis has taken me to conclude. I could have not done it without you. Thank you for all the meals, unfinished cups of tea, the hugs loaded with emotional support, the technical and computational support, and for all the times you heard my concerns. Thank you for loving me and for encouraging me to finish my thesis. You are my biggest inspiration and my biggest motivation. I love you all the elemental particles in the Universe (including dark matter).

Mamá: Gracias por enseñarme que, en un mundo principalmente dominado por hombres, las mujeres debemos dejar de soñar y debemos actuar. Fue a través de tus acciones más que de tus palabras, que me enseñaste el significado de ser feminista, de ser una mujer empoderada y, sobre todo, de ser una profesionista honorable y comprometida. Eres mi inspiración y mi mayor ejemplo de que todo se puede si se trabaja para lograrlo. Gracias por siempre cuidarme, procurarme, apoyarme y amarme. Te amo siempre.

Papá: Gracias por ser la persona que más me impulsó a estudiar y hacer Ciencia. Gracias a todas las clases que me has dado de uso de herramientas y de cómo funcionan las cosas, es que desarrollé la curiosidad por entender el porqué de todo lo que nos rodea, y ello me llevó a estudiar Física. No hubiera logrado terminar mi Carrera sin tus palabras de aliento y sin tu amor demostrado en licuados, sandwiches, “rides” al metro muy temprano y sin tu buen sentido del humor. Gracias por enseñarme a tener un corazón noble y divertido, que jamás desiste y que siempre tiene disposición para ayudar a quien lo necesite. Te amo siempre.

Vale, Iva: Gracias por elegirme como su hermana mayor, porque es una de las razones fundamentales por las cuales todos los días trato de ser una mejor persona. Ustedes dos me inspiran siempre a ser mejor, para así poder siempre apoyarlas en todo lo que alguna vez necesiten. Sépanse muy amadas por mí y jamás duden de la capacidad emocional, intelectual, académica, profesional y social que tienen, porque son maravillosas. Por y para ustedes todo, siempre.

Abu Lety y Abuelo Mike: Gracias por ser un pilar fundamental en mi Desarrollo como mujer de bien, por siempre demostrarme su amor incondicional, por sus comidas deliciosas de ambos, por contarme sus historias de vida y enseñarme a través de ellas, y sobre todo gracias por simplemente ser los mejores y más amorosos abuelitos que pude tener. No

sería la persona que soy hoy si mi abuelo no me hubiera enseñado ajedrez, no hubiera caminado conmigo al metro o a la tienda, si no me hubiera contado de sus años estudiando, y sin su ejemplo de cómo es un hombre de bien y trabajador. Sin mi abu no se diga; no sería la mujer resiliente que soy, porque gracias a ella y lo Fuerte que es, es que entiendo lo que significa amar al máximo, vivir el hoy y agradecer cada instante que la vida nos da. Gracias, Gracias, Gracias. Los amo en esta y en todas las vidas.

Aprovecho para agradecer a mi magnífica asesora, la Dra. María de la Paz Ramos Lara, quien me ha guiado, apoyado y estimulado a lo largo de este trayecto y por lo cual estoy profundamente agradecida con ella. Sin su guía, entusiasmo, sabiduría y experiencia no hubiera podido terminar este trabajo de investigación; pero fue su cálida personalidad, amabilidad, paciencia y pasión compartida por la interdisciplinariedad, lo que me marcó de por vida y por lo que esta tesis pudo concluirse. Muchas gracias, Dra. Marypaz, no me alcanzan las palabras para agradecerle todo lo que me ha enseñado en estos dos años, tanto personal como académicamente. Siempre tendrá mi más profundo respeto y mi más grande admiración.

Igualmente me gustaría agradecerles a mis sinodales, porque para mí todos son inspiración y sobre todo porque a través de sus clases, libros, charlas, y conversaciones, he podido desarrollarme como profesionista, como persona, pero sobre todas las cosas, como científica. Para mí es un honor contar con su guía, su disposición, su tiempo y sus enseñanzas.

Gracias al Dr. Luis Felipe Rodríguez, no sólo por crear una de las instituciones de investigación más importantes de México, sino por toda la labor que ha hecho por y para la ciencia en el país, la cual es tan necesaria hoy y siempre. Para mí el poder contar con su participación en este proyecto de tesis, es invaluable y muy gratificante.

Al Dr. Cuevas, le agradezco que, a pesar de tener muy contadas interacciones conmigo, siempre he podido aprender de usted y de las cosas interesantes en las que colabora. Me parece importante agradecerle por haberme inspirado tanto cuando recién entré a la preparatoria, al grado de terminar convencida de querer estudiar Física después de su plática de exoplanetas que dio una noche de las estrellas. Cuando escuché cómo transmitía su conocimiento con tanta pasión y profundo entendimiento, quedé encantada con el Cosmos y decidí dirigir mi vida a la Física. Sin duda tiene el poder y el don de transmitir conocimiento de forma grata, interesante y divertida, y para mí, es la receta perfecta para inspirar a más jóvenes a dedicarse a investigar el por qué, el cómo y el para qué del todo. Por favor siga haciendo ciencia y compartiéndola con todos los que le rodean, porque sus palabras tienen el poder de cambiarle la vida a alguien. Gracias, gracias, gracias.

Gracias al Dr. Belmont, por ser un magnífico investigador y profesor de laboratorio, pero, sobre todo, por ser un magnífico ser humano con el cual siempre pude conversar, reír, aprender y profundizar de temas muy interesantes. Muchas de las palabras que alguna vez me dijo, aún viven conmigo. Gracias.

Al Dr. Martín, por siempre estar dispuesto a platicar de ciencia o de la vida, por su guía y sus enseñanzas cuando recién comenzaba a experimentar en un laboratorio; igualmente

por tomarse el tiempo de crear un lazo amistoso con sus alumnos, tal como lo logró conmigo. Gracias.

Sin duda mi proyecto no estaría completo sin toda la ayuda y amabilidad que recibí por parte del Dr. Edgar Colín. Así que me gustaría agradecerle por guiarme, explicarme, darme un par de entrevistas, acercarme a sus colegas del RAL, y por su disposición y amabilidad durante todo el proceso. Gracias.

I would also like to thank Dr. Eimear for being an extraordinary help for my research. Thanks to her I got to opportunity to learn all the insights of CHARM, as well as the amazing team of scientists working on amazing projects at RAL. I am deeply grateful for all her kind support and will to help me in this process. Many thanks.

Another special thanks to Dr. Daghestani for very friendly and kindly showing me around the amazing RAL facilities, and for putting some time aside in his busy agenda to talk to me about CHARM and his experience while working on it. It was wonderful being able to explore de facilities of such an impressive research center. Thank you.

Last but not least, thank you to Dr. Ellison for allowing me to learn from you and your experiences when working on CHARM, it was amazing having your insight on the collaboration.

Gracias a mi alma mater, la UNAM. Desde los quince años la UNAM ha sido mi casa de estudios y no puedo agradecerle suficiente todo lo que me ha brindado. Más allá de los excelentes profesores que tuve a lo largo de mi bachillerato y mi licenciatura, las instalaciones, las actividades culturales, las oportunidades deportivas y académicas, lo que más le agradezco es ser un espacio de diálogo, de reflexión, de motivación, de interacción, de luchas sociales, de respeto, de historia, de progreso y de retos.

A mis maestros. Mi más profundo respeto y admiración a ustedes. Para mi fue un honor poder aprender de todos y cada uno de los maestros que tuve la dicha de tener. Escuchar sus clases, sus historias, sus proyectos, sus ideas, sus anhelos, es lo que más me inspiraba todos los días. La idea de algún día poseer tanto conocimiento como ustedes, es lo que me motivaba muchos días donde casi me daba por vencida. Gracias totales.

Andy, Diego. Gracias a ambos por ser mis mejores y más sinceros amigos. Son familia para mí, y siempre voy a llevarlos en mi corazón, sin importar qué pase ni en dónde esté. La vida universitaria, y en general la vida, no sabría igual de Feliz y divertida sin ustedes. De ambos he aprendido mucho, pero la lección que más marcada me quedó, es que, aunque la vida se pone muy difícil a veces, siempre es mejor si estamos juntos para sobrellevar las dificultades con un buen chiste, un Cafecito, o un cálido abrazo. Los amo y los admiro muchísimo.

Aarón. Gracias por tu valiosísima Amistad. Tengo una gran admiración hacia ti por lo inteligente, lo Generoso, divertido y noble que eres. Eres un amigo irremplazable y gracias a nuestras charlas eternas y profundas, es que pude encontrarme cuando me sentía Perdida, y eso no tengo cómo agradeceréte. Sé que llegarás tan lejos como te lo propongas, y

siempre me dará un gusto inmenso todo lo que logres a lo largo de tu vida. No olvides que puedes contar conmigo para todo.

A mis amigos y colegas científicos: Arelí, Iván, Lalo, Cris, Brandon, Ale, Oseas, Dany, Fabián, Carlos, Oscar, Alex, Rafa, y todos con los que alguna vez tuve el placer de compartir tiempo. Gracias por todo el apoyo que me brindaron, sin su paciencia, conocimiento, compañerismo, Amistad y sin sus buenas anécdotas, no hubiera logrado terminar esta Carrera tan complicada y bella a la vez. Espero que nunca les falte nada, que todas sus metas personales y profesionales se cumplan, y que siempre mantengan ese amor por la Ciencia, por la Física y por el conocimiento.

A la Sección Escolar de la Facultad de Ciencias. Gracias por tener toda la disposición del mundo para ayudarme y hacer que este proceso sea efectivo y preciso. Gracias por toda su labor dentro de la UNAM. Son parte fundamental de la Universidad.

Cooperación internacional entre México y el Reino Unido para la creación e implementación del experimento CHARM en el Gran Telescopio Milimétrico.

Portada

Dedicatorias

Agradecimientos

Índice

Abreviaciones

Introducción

Capítulo 1: Introducción Histórica del Gran Telescopio Milimétrico (GTM).

- 1.1. Interés de la comunidad astronómica mundial por una cooperación internacional en el diseño y planeación del GTM en México.
- 1.2. Aprobación del proyecto y firma del convenio internacional
- 1.3. Análisis de la posición geográfica óptima, y selección del volcán de la Sierra Negra (Puebla) para la instalación del GTM.

Capítulo 2: La radioastronomía en México y el Reino Unido.

- 2.1. Nacimiento de la radioastronomía en México.
- 2.2. El desarrollo de la radioastronomía en el Reino Unido.
- 2.3. El Rutherford Appleton Laboratory.

Capítulo 3: Precedentes tecnológicos e institucionales del CHARM.

3.1. El Global Challenges Research Fund (GCRF).

3.2. SHIRM.

Capítulo 4: Convenio de colaboración entre el Rutherford Appleton Laboratory, la Universidad de Manchester y el INAOE para el diseño y construcción del CHARM, y su instalación en el GTM.

4.1. Colaboración entre los equipos de investigación mexicano y británico para la creación del CHARM.

4.2. Contratiempos en la instalación y el buen funcionamiento del CHARM en el GTM.

4.3. Avance y resultados del CHARM en el GTM.

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

Abreviaciones.

GTM - Gran Telescopio Milimétrico

UNAM - Universidad Nacional Autónoma de México

UMass - University of Massachusetts (Universidad de Massachusetts)

INAOE - Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

CONACYT - Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (ahora CONAHCYT: Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías)

SHCP - Secretaría de Hacienda y Crédito Público

FCAD - Five College Astronomy Department

MDC - Comisión del Distrito Metropolitano

FCRAO - Five College Radio Astronomy Observatory

NSF - National Science Foundation (Fundación Nacional de Ciencias)

COSIP - College Science Improvement Program (Programa de Mejora de Ciencias Universitarias)

RCSA - Research Corporation for Science Advancement (Corporación de Investigación para el Avance de la Ciencia)

ESSCO - Electronic Space Systems Corporation

CEO - Chief Executive Officer (Director Ejecutivo)

UMET - Universidad Metropolitana (Puerto Rico)

USRA - Universities Space Research Association

RATAN-600 - Radiotelescopio en Rusia, con una antena circular de 576 metros de diámetro

NRAO - National Radio Astronomy Observatory (Observatorio Nacional de Radioastronomía)

SEP - Secretaría de Educación Pública

ICA - Ingenieros Civiles Asociados

PEF - Presupuesto de Egresos de la Federación
PACIME - Programa para el Apoyo de la Ciencia en México
ALMA - Atacama Large Millimeter Array
EMT - Executive Management Team (Equipo Directivo Ejecutivo)
STAC - Scientific and Technical Advisory Committee (Comité Científico y Técnico de Asesoramiento)
EOC - Engineering Overseeing Committee (Comité de Supervisión de Ingeniería)
DIRAC - Dirección de Arquitectura y Construcción
CFE - Comisión Federal de Electricidad
TIW – Toronto Iron Works
MAN - MAN Technologie
NASA - National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio)
CHARM - Collaborative Heterodyne Amplifier Receiver for Mexico (Mezclador Colaborativo de Amplificación Heterodina para México)
OANTON - Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla
VLBA - Very Long Baseline Array
CRyA - Centro de Radioastronomía y Astrofísica (ahora conocido como Instituto de Radioastronomía y Astrofísica, IRyA)
IRyA - Instituto de Radioastronomía y Astrofísica
UKRI - United Kingdom Research and Innovation (Investigación e Innovación del Reino Unido)
STFC - Science and Technology Facilities Council (Consejo de Instalaciones Científicas y Tecnológicas)
RAL - Rutherford Appleton Laboratory
ASTEC - Astronomical Systems Training, Engineering and Collaboration (Entrenamiento en Sistemas Astronómicos, Ingeniería y Colaboración)
GCRF - Global Challenges Research Fund (Fondo de Investigación de Desafíos Globales)
SHIRM - Sub Harmonic Image Rejection Mixer (Mezclador de Rechazo de Imagen Subarmónico)
MMT - Millimetre-Wave Technology (Grupo de Tecnología de Ondas Milimétricas)
CEOI - Centre for Earth Observation Instrumentation (Centro para Instrumentación de Observación Terrestre)
CAD - Computer-Aided Design (Diseño Asistido por Computadora)
LMT - Large Millimeter Telescope (Gran Telescopio Milimétrico)
DCS - Data Collection System (Sistema de Recolección de Datos)
AT - Astronomical Telescope (Telescopio Astronómico)
ToITEC - The Ten-band Camera (Cámara de Diez Bandas)
STRC - Science and Technology Research Council (Consejo de Investigación en Ciencia y Tecnología)

Introducción

La Física ha sido un pilar fundamental en mi camino hacia la comprensión y el entendimiento de los fenómenos que ocurren a mi alrededor. Sin ella no hubiera podido saciar mi curiosidad y sobre todo, mis propósitos académicos. La divulgación de la ciencia fue el medio que me acercó a los temas relacionados con la astronomía y la física nuclear desde antes de entrar al bachillerato, pero fue su estudio profesional el que me llevó a entender que existen muchas otras ramas de esta bella ciencia cuya difusión está descuidada. Encuentro sumamente importante que todas las ramas de la ciencia tengan difusión y sobre todo que sea un conocimiento universal y accesible para todos. Como parte de mi proyecto de tesis, satisfago en cierto grado mi deseo por transmitir el conocimiento a otras personas y el poder plasmar la historia de un instrumento tan importante como lo es el Gran Telescopio Milimétrico (GTM). Otra de mis pasiones de vida que descubrí realizando mi tesis, es la interdisciplinariedad y lo hermosa que es; el poder utilizar las metodologías de estudio de otras ramas de investigación como lo son el periodismo, la historia, la lógica y la física para poder contar una sola historia en un par de párrafos, me parece una herramienta poderosa y no tan apreciada.

Los científicos tenemos la responsabilidad y la capacidad de escribir sobre Historia, ya que nuestro conocimiento profundo de los principios fisicomatemáticos que sustentan los instrumentos, descubrimientos o experimentos de los cuales escribimos, nos permite simplificar ideas complejas a conceptos más sencillos; de este modo, podemos escribir textos más accesibles para cualquier lector, independientemente de su formación académica. Hacer la ciencia más inclusiva implica comunicarla sin distinción de clase social, nivel educativo o situación socioeconómica. Una forma de reducir la brecha en el acceso a la divulgación científica depende de nuestra habilidad para sintetizar dichos conocimientos ya que, de lo contrario, los artículos históricos y divulgativos se limitan a un público especializado.

Comencé a interesarme por el GTM cuando buscando una institución en donde realizar mi servicio social encontré la convocatoria publicada para realizarlo con mi asesora, la Dra. María de la Paz Ramos Lara. Fue entonces cuando desde octubre del 2022 comenzamos a planear y a enfocar el servicio social hacia una investigación que culminara como tesis para poder titularme, y dado que dentro de mis planes estaba mudarme al Reino Unido, la doctora sugirió que eligiera un tema que relacionara directamente a México con dicho país, para así poder tener un trabajo de interés para ambas partes. Investigando que tipo de proyectos científicos se habían desarrollado mediante algún convenio entre ambos países, encontré el experimento Collaborative Heterodyne Astronomical Receiver for Mexico (CHARM), que actualmente se localiza en el GTM.

El proyecto me pareció muy interesante porque representa un claro ejemplo de cómo se ejecutan los proyectos internacionales de tal magnitud, y cómo a pesar de la distancia, la ciencia logra unir a las diferentes instituciones, investigadores y recursos, cuando de un fin común se trata.

La tesis consta de cuatro capítulos.

El primero está dedicado a entender el proceso previo a la construcción del Gran Telescopio Milimétrico. En este capítulo se detalla la historia de colaboración entre México y Estados Unidos, desde la parte técnico-científica, la gubernamental, la burocrática y la humana.

El segundo capítulo habla sobre los precedentes históricos y técnicos en el campo de la radioastronomía tanto en México como en el Reino Unido. Este capítulo permite contextualizar los avances científico-tecnológicos previos a la colaboración entre el INAOE, el RAL y la Universidad de Manchester.

El tercero se refiere al convenio entre las instituciones mexicanas y británicas para poder instalar el CHARM en el GTM. Se profundiza en el tipo de colaboración que se acordó, que fue a través del Global Challenges Research Fund, y se habla también sobre las instituciones participantes por parte del Reino Unido las cuales presentan un alto nivel en materia de desarrollo tecnológico en este campo.

El cuarto trata sobre la recreación histórica de cómo se llevó a cabo el convenio. Esta información se obtuvo a partir de entrevistas realizadas a los investigadores involucrados en el proyecto. Se habla también sobre los retos y las complicaciones a las que se enfrentaron, así como de los resultados obtenidos.

Finalmente, se presentan las conclusiones y el análisis sobre cómo las colaboraciones bilaterales benefician a México principalmente, y que también ayudan al desarrollo de nuevas tecnologías especializadas que nos permiten entender mejor los fenómenos que nos rodean.

Esperando que los hechos, datos, avances tecnológicos y la lectura en general, le sean de interés al lector, y que esta tesis, pueda ayudar a comprender un poco mejor la importancia de las colaboraciones internacionales en el ámbito académico y científico.

CAPÍTULO 1.

Introducción histórica del Gran Telescopio Milimétrico (GTM)

El Gran Telescopio Milimétrico (GTM) es un instrumento científico de gran importancia para la investigación astronómica de frontera a nivel nacional e internacional. Su origen data de 1989 cuando el doctor Alfonso Serrano Pérez-Grovas (1950-2011), entonces director del Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) entabló conversaciones con el Dr. Paul Goldsmith (director de la Universidad de Massachusetts - UMass), quien se había dirigido a él para proponer un convenio bilateral de investigación entre México y Estados Unidos para diseñar y construir la antena más grande en su tipo en el mundo e instalarla en una posición geográfica del territorio mexicano cuyas condiciones meteorológicas fueran óptimas para realizar estudios radioastronómicos.

El proyecto fue aprobado en mayo de 1994, y debido a que se estimó un costo de 50 millones de dólares, las instituciones participantes fueron, además de la UNAM y la UMass, el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE), el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt),¹ la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) y el Banco Mundial. El tamaño de la antena se fijó en 50 metros de diámetro para estudiar microondas de frecuencia milimétrica, dando la posibilidad de investigar la formación de estrellas, sistemas planetarios, galaxias distantes, e incluso información sobre las condiciones iniciales del universo.

Este capítulo se centra en el contexto astronómico internacional que propició la invitación a la comunidad astronómica mexicana para colaborar en sus proyectos, entre ellos la instalación del GTM en Puebla. Se explica la forma en la que se superaron los problemas burocráticos y financieros, y la estrategia que siguieron para definir la posición geográfica idónea para instalar el observatorio.

1.1. Interés de la comunidad astronómica mundial por una cooperación internacional en el diseño y planeación del GTM en México.

El Five College Astronomy Department (FCAD) es un grupo de científicos e ingenieros, provenientes del Pioneer Valley de Massachusetts, que trabajan en conjunto en un programa de investigación en astronomía de ondas milimétricas; dicho grupo de investigación se fundó en febrero de 1960. [1] En sus principios, el departamento quería abarcar tres áreas principales: la investigación astronómica, el desarrollo de instrumentación de última generación y finalmente, la capacitación de estudiantes universitarios y de posgrado en astronomía observacional e instrumentación astronómica. [2]

La Astronomía en el Pioneer Valley de Massachusetts ha tenido una destacada trayectoria y las instituciones que la han acompañado son el Smith College², Amherst

¹ Actualmente Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT).

² Universidad privada femenina estadounidense ubicada en Northampton, Massachusetts.

College³ y del Mount Holyoke College⁴. [3] Se dice que Amherst College, en donde la Astronomía comenzó a ser enseñada desde 1825, fue la segunda institución de educación superior en los Estados Unidos que adquirió instrumentación astronómica, entre ellas un telescopio de tránsito y un reloj astronómico. Fue gracias al Cometa de 1843 y al descubrimiento de Neptuno en 1846, que el programa de Astronomía en Amherst creció, y eso llevó a que en 1853 se instalara el famoso telescopio ecuatorial en el Observatorio Lawrence.[3] Por su parte el Smith College también tiene su historia con la Astronomía; se conoce que el curso de Astronomía estaba en la primera lista publicada de cursos que ofrecía la Universidad. [3]

El último de los colegios que se uniría al FCAD sería el Hampshire College⁵, el cual fue diseñado y fundado en 1965 por las otras cuatro instituciones para ser un centro de enseñanza de educación superior, además se buscaba que fuera experimental e innovador. El primer decano que tuvo dicho colegio, Everett M. Hafner⁶(1920-1998), diseñó que la Astronomía fuera un punto en el cual se enfocaran dentro de las ciencias físicas, y fue lo anterior lo que llevó al Hampshire College a unirse al Four College Astronomy Department, el cual cambió de Four a Five, en el momento en el que se unió al departamento. [3]

Ahora es importante mencionar que uno de los obstáculos que tenía el FCAD era que no contaba con una instalación adecuada para la observación astronómica, lo que le impedía ser líder en los programas de Astronomía. Richard Huguenin⁷(1937-2012) propuso que se construyera un radio observatorio, y su plan incluyó traer staff de Harvard: tres radio-ingenieros, tres técnicos, y un investigador asociado postdoctoral; con esto propuso construir el telescopio “en casa”. [3]

El mayor radio telescopio en el mundo capaz de observar pulsares⁸ era en ese momento, el Telescopio Arecibo⁹ en Puerto Rico. Construir otro gran telescopio como ese era imposible de hacer en Nueva Inglaterra, por lo que Huguenin optó por diseñar un arreglo de 32 radiotelescopios pequeños (“mini-Arecibos”) de 120 pies de diámetro cada uno, enlazados electrónicamente para actuar como un solo telescopio. Se eligió entonces que se construyera en la Reserva de Quabbin, ubicada en la Península de Prescott, que era considerado como un lugar único en Massachussets, ya que se

³ Universidad privada ubicada en Amherst, Massachusetts. Fundada en 1821.

⁴ Universidad privada de artes liberales para mujeres en South Hadley, Massachusetts.

⁵ Universidad privada de artes liberales en Amherst, Massachusetts. Fue inaugurada en 1970.

⁶ Físico defensor de la Astronomía de rayos gamma, así como de la astrobiología.

⁷ Astrónomo de la Universidad de Harvard. Ocupó un puesto de investigación en la Universidad de Harvard de 1963 a 1968, y un puesto de profesor en la Universidad de Massachusetts Amherst de 1968 a 1982. Propuso la creación del Five College Radio Astronomy Observatory.

⁸ Estrellas de neutrones que giran rápidamente y emiten pulsos de radiación a intervalos regulares que oscilan entre segundos y milisegundos. Estos objetos cósmicos canalizan partículas por medio de los campos magnéticos de sus polos, acelerándolas a velocidades relativistas. De esa actividad se generan dos haces de luz, uno por cada polo.

⁹ Fue un telescopio situado en Arecibo, Puerto Rico. Estuvo administrado por 45 años por la Universidad Cornell con un acuerdo de cooperación con la National Science Foundation hasta el mes de octubre de 2011. A partir de esa fecha los nuevos administradores son la Universidad Metropolitana (UMET), SRI International y The Universities Space Research Association (USRA). El radiotelescopio fue el mayor telescopio jamás construido gracias a sus 305 metros de diámetro, hasta la construcción del RATAN-600 (Rusia) con su antena circular de 576 metros de diámetro.

encuentra a cinco millas de todas las posibles fuentes de radio interferencia causadas por líneas eléctricas y carreteras. A la larga estaba asegurado que la reserva se quedara alejada de la civilización ya que ni siquiera estaba abierta al público. Fue así como en noviembre de 1969 la Comisión del Distrito Metropolitano (MDC por sus siglas en inglés), le otorgó un permiso a la UMass para hacer uso de aproximadamente 20 acres de la reserva, para un observatorio. [3]

A dicho observatorio se le llamó el Observatorio de Radio Astronomía de los Cinco Colegios (FCRAO, “Five College Radio Astronomy Observatory”, por sus siglas en inglés). Se construyó a unas 20 millas del campus de la UMass, e inicialmente se utilizaba para el estudio de pulsares en longitudes de onda de metros. Éste inició en 1970 con una subvención de la Fundación Nacional de Ciencias (NSF, National Science Foundation¹⁰) a través del “Programa de Mejora para la Ciencia Universitaria” (COSIP¹¹, “College Science Improvement Program”, por sus siglas en inglés), el cual otorgó \$75,200 dólares [3]; igualmente el FCAD se habían comprometido con \$105,000 en fondos de contrapartida para el COSIP. En particular, el Hampshire College compró equipos informáticos por valor de \$27,900, el Amherst College donó alrededor de \$20,000, Smith College y Mount Holyoke College dieron cada uno \$2,000, y la UMass proporcionó más de \$30,000. Ese otoño (1970), la Corporación de Investigación privada (RCSA¹², “Research Corporation for Science Advancement”, por sus siglas en inglés) otorgó \$73,000 a Huguenin y al recién contratado radioastrónomo, Joseph Taylor¹³(1941-), para su investigación sobre pulsares (en ese momento, una de las subvenciones más grandes que la Corporación de Investigación había otorgado) [3]. El telescopio inicial del FCRAO era una antena de baja frecuencia personalizada para buscar púlsares en la galaxia. [4]

A pesar de contar con mucha burocracia por parte del estado y las instituciones gubernamentales, la primera antena del Observatorio fue completada en noviembre de 1970, y con ello se lograron hacer las primeras observaciones de pulsares en diciembre del mismo año. Durante la primavera y el verano de 1971, cuatro estudiantes universitarios y un estudiante del Amherst College de nombre David Helfand¹⁴(1950-), llevaron a cabo proyectos de investigación sobre pulsares. Desde entonces el FCRAO inició la tradición, que mencionan que un observatorio universitario exitoso debe basarse en tres pilares: la investigación pionera, el desarrollo de instrumentación de vanguardia y la formación de estudiantes. Cabe

¹⁰ La Fundación Nacional de Ciencias es una agencia gubernamental de los Estados Unidos que impulsa investigación y educación fundamental en todos los campos no médicos de la Ciencia y la Ingeniería.

¹¹ Programa de Mejora de Ciencias Universitarias (COSIP), que funcionó entre 1967 y 1973, respaldó planes integrales de universidades y consorcios predominantemente de pregrado para el desarrollo de sus programas de instrucción científica.

¹² Es una organización de los Estados Unidos dedicada al avance de la ciencia y a financiar proyectos de investigación en ciencias físicas. Desde 1912, ha identificado tendencias en ciencia y educación y ha financiado numerosos proyectos de investigación científica.

¹³ Joseph Hooton Taylor, Jr. es un astrofísico estadounidense, ganador del Premio Nobel de Física junto con su estudiante Russell Alan Hulse en 1993, por el descubrimiento del primer pulsar binario que abrió nuevas posibilidades para el estudio de la gravitación.

¹⁴ David J. Helfand es un astrónomo norteamericano que fungió como presidente de la Quest University en Canadá del 2008 al 2015.

mencionar que el FCRAO operaba en longitudes de onda del espectro del radio (longitudes de onda de metro), donde se pueden estudiar pulsares.

Cuando el FCRAO planeaba su segunda fase de expansión, donde se buscaba pasar de cuatro a ocho antenas, nacía una nueva área de investigación: la investigación a frecuencias mil veces más grandes. Lo que implica longitudes de onda mil veces más chicas. Esto era algo en lo que los radioastrónomos no solían enfocarse, en parte por los altos costos de los instrumentos de recepción y el poco interés de la comunidad astronómica por esa área.[3]

Recordemos que en 1963 Alan Barrett¹⁵ (1927-1991) y Sander Weinreb¹⁶ (1936-) encontraron la línea de emisión del OH en una supernova remanente de Cassiopeia A, la cual fue la primera detección de radio de una molécula interestelar en longitudes de onda de radio [5]. Aunque la emisión de OH estaba en una longitud de onda de 18 centímetros, se sabía que otras moléculas más complejas emitían principalmente en longitudes de onda más cortas según datos de laboratorio. Cinco años después, se detectó la emisión de radio de agua interestelar (H₂O) y amoníaco (NH₃), a una longitud de onda de aproximadamente 1 centímetro, por científicos de la Universidad de California. En 1970 físicos del Laboratorios Bell lograron la detección de emisión de moléculas de monóxido de carbono (CO) a longitudes de onda aún más cortas (milimétricas). [3] Lo anterior apuntaba a que se faltaba mucho más por estudiar, descubrir y experimentar en la radioastronomía.

Uno de los investigadores que inicialmente vio mucho potencial en esta nueva rama de la radioastronomía, fue Olof Rydbeck¹⁷ (1913-1995), que en ese momento fungía como el director del Observatorio Espacial Onsala¹⁸ de la Universidad Tecnológica de Chalmers, en Suecia [3]. Para que un radiotelescopio pueda captar frecuencias de radio débiles, la apertura del telescopio y la sensibilidad de los componentes electrónicos que procesan la señal, tienen un papel fundamental en el proceso de detección; esto se cuantifica en términos de “temperatura de ruido” del sistema que está recibiendo la señal, lo cual se traduce en medir la cantidad de “ruido” de la señal astronómica.[3]

Rydbeck tenía la idea de que, con ayuda de los observatorios de Estados Unidos, podía competir mejor en el ámbito de la investigación, si lograba que su grupo de trabajo fuera capaz de construir mejores receptores, es decir, que produjeran menor ruido que los que en ese momento se tenían. Logró su objetivo al desarrollar preamplificadores de máser de estado sólido extremadamente silenciosos, en los receptores del Observatorio de Onsala. [3]

Rydbeck sabía que el radiotelescopio de Onsala estaba diseñado para trabajar con longitudes de onda de centímetros, y no operaba adecuadamente para longitudes de

¹⁵ Astrofísico del Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT)

¹⁶ Astrofísica del Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT)

¹⁷ Fue un diplomático sueco y el fundador del Observatorio Espacial de Onsala y uno de los pioneros mundiales de la radioastronomía durante su rápido crecimiento después de la Segunda Guerra Mundial.

¹⁸ Onsala es Centro Nacional Sueco de Radioastronomía. Proporciona a los científicos con equipo para estudiar la Tierra y el resto del Universo. El observatorio opera dos radio telescopios en Onsala, a 45km al sur de Gotemburgo, y participa en varios proyectos internacionales a la vez.

onda más cortas. Él comenzó a familiarizarse con un telescopio de mayor frecuencia que le pertenecía a la Corporación de Sistemas Electrónicos Espaciales (ESSCO¹⁹, “Electronic Space Systems Corporation”, por sus siglas en inglés), el cual se ubicaba en West Concord, MA. Le favoreció que uno de sus ex alumnos de doctorado, Sigfrid Yngvesson,²⁰ trabajaba en la Universidad de Massachusetts, en el departamento de Ingeniería Eléctrica y Computacional, y tenía un vínculo estrecho con ESSCO. De esta manera, Rydbeck pudo pasar un año sabático de 1972-1973 en Amherst y familiarizarse con la nueva tecnología que se estaba desarrollando allí. [3]

Fue entonces que ESSCO le ofreció a Rydbeck un telescopio más pequeño que ellos mismos habían diseñado (de 14 metros de diámetro), a la espera de que Onsala comprara el sistema más grande que finalmente se adquirió (con una superficie reflectora de 20 metros de diámetro). Esa empresa le permitió a Yngvesson trabajar con receptores de máser a frecuencias cada vez más altas, donde utilizaban materiales como el rubí y el rutilo dopado con hierro. Rydbeck vio esta oportunidad y le propuso al CEO [Chief Executive Officer, por sus siglas en inglés] de la compañía, que consideraba mejor idea que le donaran el telescopio a la UMass, y con eso les aseguró que tendrían colaboraciones y negocios más adelante. Lo anterior realmente fue uno de los principales problemas con los que se vio involucrado el equipo que llevó el proyecto del GTM unas décadas después, ya que el haber asegurado que se tendrían colaboraciones con esta empresa en específico provocó un descontento, el cual mencionaré más adelante. [3]

En diciembre 28 de 1972, ESSCO propuso a Rydbeck y Huguenin ser los proveedores de un sistema de radiotelescopios completo para la UMass, que incluía un disco de 14 metros de diámetro dentro de un radomo²¹ protector y radiotransparente²². Se estimaba que el radiotelescopio tendría una precisión en su superficie de 0.15 milímetros, y una precisión de objetivo (pointing accuracy) suficientemente buena para poder hacer observaciones de hasta 300 GHz (1mm). El costo estimado fue de \$400,000 USD, de ese tiempo, de los cuales \$150,000 serían donados por ESSCO. [3]

Ese año se descubrió la emisión en longitudes de onda milimétricas desde el espacio interestelar molecular (por ejemplo, de monóxido de carbono) provocando un cambio en la dirección de los planes de la comunidad científica, y en particular de Rydbeck, lo que llevó a la inauguración en 1976 del plato de 14 metros de diámetro, que en ese momento era el telescopio más grande de su tipo en Norte América. Desde entonces, el telescopio FCRAO de 14 metros desempeñó un importante papel internacional en

¹⁹ ESSCO es un fabricante líder de radomos terrestres con estructura espacial de metal que admiten una variedad de aplicaciones, que incluyen defensa aérea, radar meteorológico, control de tráfico aéreo y telemetría y seguimiento por satélite.

²⁰ Profesor Emérito de la UMass.

²¹ Estructura esférica que protege al radiotelescopio de los efectos del viento y de gradientes de temperatura.

²² Que permite el paso de radiación, especialmente de los rayos X.

la investigación astronómica, produciendo estudios innovadores de la distribución de las nubes moleculares en nuestra Vía Láctea y del contenido de gas de galaxias externas y estudios pioneros de la química de nubes interestelares, procesos asociados con la formación de estrellas, y la química y física de los cometas [3]. El desarrollo de instrumentación dentro de los laboratorios de la FCRAO contribuyó al descubrimiento del sistema de pulsar binario PSR B1913+16 por Joseph Taylor y Russell Hulse²³ (1950-), por el que recibieron el Premio Nobel de Física en 1993. [4]

El Dr. William Irvine²⁴ en su libro "Reflections on the Growth of Astronomy at the University of Massachusetts and the Five College Astronomy Department", habla sobre una de las primeras colaboraciones entre el FCAD y la Universidad Nacional Autónoma de México²⁵ (UNAM) a principios de la década de los noventa, cuando Stephen Strom²⁶ se las ingenió para darle un rumbo a los estudios astronómicos de la UMass, principalmente al influenciar al FCAD de aumentar el presupuesto para colaboraciones astronómicas, y con ellas asegurar el acceso a instalaciones modernas a los astrónomos del FCAD [3]. Inicialmente se tendría una colaboración con la Universidad de Wyoming, en su Observatorio Infrarrojo, pero debido a que las condiciones de observación con las que contaba no eran adecuadas para los programas de estudio que ofrecía la UMass, fue que decidieron que sería mejor colaborar con la UNAM para utilizar el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir²⁷. A pesar de que dicha colaboración no fue tampoco de mucho uso para los astrónomos de la FCRAO, sin duda fue un punto importantísimo para la futura colaboración que tendría lugar en el Volcán Sierra Negra. [3]

Aproximadamente después del décimo aniversario de haber inaugurado el telescopio de 14 metros en Quabbin, los astrónomos del Five College se percatan de que su Observatorio se está quedando atrás gracias a los nuevos radiotelescopios que estaban siendo construidos en Europa y en Japón. Lo anterior significó una amenaza de perder el fondo de apoyo financiero proporcionado por el NSF, y con ello, se veía amenazado el FCRAO. [3]

Los radiotelescopios analizaban datos de solo una posición en el cielo a la vez, aunque la información de puntos circundantes se representaba en el plano focal. Esto fue una consecuencia de la complejidad del equipo receptor necesario: mientras que en la astronomía óptica el film fotográfico o los detectores CCD (por sus siglas en inglés), podía registrar simultáneamente información de muchos puntos en el campo

²³ Físico estadounidense y ganador del Premio Nobel de Física, "por el descubrimiento de un nuevo tipo de púlsar, un descubrimiento que ha abierto nuevas posibilidades para el estudio de la gravitación".

²⁴ Profesor emérito de la UMass. Irvine es autor de más de 200 artículos publicados, habiendo trabajado en cosmología teórica y en estudios teóricos y observacionales de atmósferas planetarias, y más recientemente utilizando la radioastronomía como una sonda de la química interestelar y cometaria.

²⁵ Es la mayor y más destacada universidad pública mexicana debido a una alta demanda y a su carácter público, laico y gratuito. Sus numerosas publicaciones e investigaciones en todas las áreas del conocimiento la convierten en la institución mexicana con mayor producción científica.

²⁶ Presidente del FCAD entre 1984 y 1997.

²⁷ Observatorio situado en la sierra homónima, ubicado en Ensenada, Baja California, México. Fue construido por la Universidad Nacional Autónoma de México. En 1971 se instalan los telescopios de 84cm. y de 1.5m. Y en 1979 la UNAM inaugura el telescopio de 2.1m. Se trata del observatorio más importante de México. Está situado a una altitud de 2,800 m s. n. m. En la actualidad cuenta con 11 telescopios.

de visión para formar una imagen, una "cámara" de radio análoga necesitaría muchos receptores, cada uno grabando los datos para un "píxel". Contemplando lo anterior en mente, y sabiendo que los fotones de radio estaban disponibles en un principio, fue que Paul Goldsmith²⁸, F. Peter Schloerb²⁹ y Neal Erickson³⁰ decidieron que el futuro del FCRAO dependía de diseñar y construir las primeras "cámaras" (conocidas como matrices de plano focal) para la astronomía de radio de alta frecuencia. El primer instrumento que desarrollaron fue llamado "QUARRY" (Quabbin Array), y contaba con 16 receptores y una velocidad aumentada con la que podían mapear el cielo; más adelante desarrollaron el segundo arreglo, llamado "SEQUOIA" (Second Quabbin Optical Imaging Array) el cual tenía el doble de píxeles. Este último arreglo fue un instrumento inicial para el GTM. [3]

La competencia a la que se enfrentaban eran el radiotelescopio de Alemania-Francia-España de 30 metros de diámetro, y el radiotelescopio japonés de 45 metros de diámetro, así como el Observatorio Nacional de Radio Astronomía³¹ en Green Bank, West Virginia, (NRAO, National Radio Astronomy Observatory, por sus siglas en inglés) de 300 pies de diámetro (60 metros de longitud focal), el cual colapsó en 1988. Fue así como comenzaron a planear la construcción de un nuevo y más potente radiotelescopio, con ayuda de ESSCO. Mientras en Estados Unidos se ponían de acuerdo con el gobierno y la NSF sobre los costos de construcción, ubicación y prioridades de financiamiento, en México se consiguió un aumento significativo para impulsar la infraestructura científico-técnica del país. Fue así como Strom les propuso a sus colegas Alfonso Serrano (1950 - 2011)³², que en ese momento era el director del Instituto de Astronomía de la UNAM, y a Luis Carrasco (1948-)³³, director del Observatorio San Pedro Mártir, que México y la UMass podrían colaborar en el GTM (en ese momento ya tenían un nombre para el nuevo radiotelescopio), o en un telescopio infrarrojo óptico. [3]

El proyecto era ambicioso, al considerar un radiotelescopio de 50 metros de diámetro capaz de estudiar los procesos de formación de estrellas y sistemas planetarios. Se promovía esto como un rango de oportunidades para México, en términos de aplicaciones prácticas, de negocio, científicas y empresariales. Al ser un proyecto de clase mundial, se esperaba tener un impacto en la comunidad científica internacional,

²⁸ 1980 - 1992 Director asociado del Five College Radio Astronomy Observatory. Actualmente (2024) Goldsmith es investigador senior y supervisor de grupo en el Jet Propulsion Laboratory de la NASA.

²⁹ (2024) Director de la Oficina del Observatorio de Radioastronomía de Five College (FCRAO) y del Gran Telescopio Milimétrico (LMT)

³⁰ Desde 1979 trabaja en el Departamento de Astronomía de la UMass, donde actualmente es profesor de investigación.

³¹ Es el radiotelescopio totalmente orientable más grande del mundo. El ahora conocido como Green Bank Telescope, fue parte del Observatorio Nacional de Radioastronomía (NRAO) hasta el 30 de septiembre de 2016. El radiotelescopio actual lo construyeron después de que en 1988 colapsara el radiotelescopio de 300 pies de diámetro que llevaba el mismo nombre y se encontraba en el mismo lugar que el actual.

³² Fue un astrónomo, investigador y académico mexicano, director del Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México, del Programa Universitario de Investigación y Desarrollo Espacial (PUIDE), también de esa universidad, y del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Fue el gestor y promotor del GTM, proyecto conjunto entre el INAOE y la Universidad de Massachusetts, Amherst, Estados Unidos.

³³ Investigador Titular D en el INAOE.

con la perspectiva de atraer talento internacional a México, propiciar el crecimiento del INAOE, y reducir la emigración de talento científico nacional. [6]

En 1992 Ernesto Zedillo,³⁴ secretario de educación pública en México, dio su aprobación para la presentación de una solicitud de financiamiento destinado a la construcción del GTM en México. Puso como condición el promover la participación de la industria nacional, con la idea de que compitiera a niveles tecnológicos (sin precedentes), tanto con empresas extranjeras como con la industria nacional. Para lograr dicha condición, la Secretaría de Educación Pública³⁵ (SEP) solicitó la colaboración del Ingeniero Gilberto Borja³⁶ (1929-2007), quien presidía Ingenieros Civiles Asociados³⁷ (ICA), para establecer un comité (Comité Borja) que evaluara la capacidad de la industria mexicana para contribuir en el proyecto. [6]

Dicho comité evaluó la situación y concluyó que las empresas mexicanas estaban preparadas para asumir aproximadamente el 25% del proyecto. Dicho porcentaje estimado por el comité aumentó significativamente con el transcurso del tiempo y conforme avanzaba el proyecto. Así, al concluir las obras en 2006, la industria nacional realizó el 85 % del trabajo en el proyecto del GTM. [6]

En 1993, el entonces Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, ahora CONAHCYT), evaluó el anteproyecto presentado por el INAOE, y tomó la decisión de no respaldarlo. Sin embargo, la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica tuvo una perspectiva diferente y brindó su apoyo al proyecto. Esta divergencia de opiniones a nivel gubernamental generó un conflicto dentro de la SEP, dado que el CONACYT pertenecía a la misma estructura. Como consecuencia de las discrepancias, el proyecto del GTM se detuvo. [6]

En mayo de 1994, presionado por las autoridades superiores de la SEP, el CONACYT aceptó participar en el proyecto y proporcionó los primeros recursos monetarios destinados al proyecto. Se otorgaron 40.000 dólares específicamente para determinar la ubicación del telescopio. El INAOE afirmó que la construcción del telescopio sería en seis años y con ello obtuvo el respaldo de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público³⁸ (SHCP), que se comprometió a asignar recursos equivalentes a 4 millones de dólares anuales para el proyecto. Estos fondos serían parte del Presupuesto de Egresos de la Federación (PEF) y se destinarían inicialmente a la construcción del telescopio. [6]

Una vez aprobado, el proyecto se enfrentó a una serie de problemas burocráticos y financieros, pues la estimación inicial quedó muy por debajo de la final. Sin embargo,

³⁴ Economista y político mexicano que se desempeñó como presidente de México desde el 1 de diciembre de 1994 hasta el 30 de noviembre de 2000.

³⁵ Es el despacho del poder ejecutivo federal con funciones de ministerio de Educación en México.

³⁶ Fue ingeniero civil y empresario mexicano. En el sector privado, trabajó para Ingenieros Civiles Asociados (ICA) desde 1950.

³⁷ Empresa mexicana de construcción de infraestructura fundada en el año 1947. Está involucrada en proyectos como la construcción de carreteras, de plantas hidroeléctricas, puertos marítimos y aeropuertos, sistemas de metro, refinerías, plantas industriales y viviendas.

³⁸ Es el despacho del poder ejecutivo federal con funciones de ministerio de Finanzas en México.

como este problema persistió durante todo el proceso (como se verá en la sección 1.4.), se procedió a dar inicio mediante un convenio entre las instituciones mexicanas.

1.2. Aprobación del proyecto y firma del convenio internacional

En los años entre 1995 y 1997, se estimó que el costo total del GTM oscilaría entre 80 y 100 millones de dólares, lo que implicaba que la construcción tomaría de 10 a 12 años, es decir, que se completaría entre 2005 y 2007. La idea era que la contraparte estadounidense contribuyera con una cantidad monetaria equivalente.[6]

La SHCP planteó que, una vez finalizada la construcción, al igual que en cualquier proyecto de inversión, la asignación anual de 4 millones de dólares debería mantenerse y destinarse a los gastos operativos del GTM. Con base en este compromiso, en noviembre de 1994, se firmó el primer Memorando General de Entendimiento entre el INAOE y la UMass para el desarrollo del proyecto GTM. Además, CONACYT y el INAOE firmaron un convenio en el que se detallaba el financiamiento adicional proporcionado por el Banco Mundial a través del Programa para el apoyo de la Ciencia en México (PACIME)³⁹, administrado por CONACYT.[6]

A pesar de estos avances, la devaluación del peso en diciembre de 1994 tuvo un impacto en los compromisos financieros. Las cantidades prometidas por PACIME y SHCP para 1995 se redujeron a la mitad. Mientras tanto, en paralelo, diversas organizaciones de América, Europa y Japón comenzaron a concebir la idea de crear el ALMA⁴⁰ en Chile (Atacama Large Millimeter Array), que constaría de 64 antenas de 12 metros de diámetro cada una. El presupuesto estimado inicialmente para ALMA ascendía a 562 millones de dólares, superando ampliamente la asignación presupuestaria destinada al GTM en México. [6]

En abril de 1995, se inicia la financiación del proyecto GTM con la recepción de los fondos de PACIME, que ascienden a tan solo 400 mil dólares, calculados a partir de los precios de 1994. En junio del mismo año, la SHCP comienza a desembolsar los fondos comprometidos en el Presupuesto de Egresos de la Federación (PEF). La contribución de la SHCP para ese año alcanza los 1.9 millones de dólares, cerca del 50% de lo acordado en términos de precios de 1994. En paralelo, el INAOE instala equipos de medición en quince lugares en el país, para seleccionar la localización más adecuada para el GTM. Hablaremos de dichos estudios en el apartado siguiente.[6]

³⁹ Fue una iniciativa impulsada por el CONACYT en México, que se centró en mejorar y fortalecer la capacidad científica y tecnológica del país. Este programa buscaba promover la descentralización de la ciencia y la tecnología, llevando recursos y apoyo a distintas regiones del país, especialmente a aquellas menos desarrolladas en términos de infraestructura científica.

⁴⁰ ALMA es una asociación internacional entre Europa, Norteamérica y Asia del Este, en colaboración con la República de Chile, es el mayor proyecto astronómico del mundo. Se trata de un interferómetro revolucionario que comprende un conjunto de 66 antenas (antenas también llamadas: reflectores o radiotelescopios cuando es de una única antena) de siete y doce metros de diámetro destinados a observar longitudes de onda milimétricas y submilimétricas. El proyecto fue construido en el llano de Chajnantor, 5058 metros de altitud, en el desierto de Atacama, en la zona norte de Chile. Con un coste de más de 1000 millones de euros es el mayor y más caro radiotelescopio terrestre construido en el mundo.

En este contexto, la UMass solicita al INAOE que le transmita los recursos otorgados por el Gobierno Mexicano con el fin de que la empresa ESSCO pueda avanzar con el diseño definitivo y la construcción del proyecto. Cabe mencionar que uno de los directivos de ESSCO fue un miembro de la Cámara de Representantes de los Estados Unidos, y su influencia fue crucial en la obtención de recursos del Congreso de los Estados Unidos para que UMass participe en el proyecto.[6]

El INAOE rechaza la petición de UMass, argumentando que esto iría en contra de las normativas mexicanas, e insiste en llevar a cabo un proceso de licitación pública internacional, con la participación de ESSCO y otras compañías interesadas en participar. Esta discrepancia da lugar a una demanda presentada por ESSCO ante los tribunales de Massachusetts, dirigida tanto contra UMass como contra el INAOE en calidad de codefensor. La demanda culmina con un fallo favorable a UMass, en gran medida gracias a la colaboración decisiva del INAOE.[6]

En un esfuerzo por supervisar y dirigir el proyecto, se crea el Grupo Ejecutivo Directivo Binacional⁴¹ (EMT, “Executive Management Team”, por sus siglas en inglés). Como parte de esta estructura, se estableció el Comité Científico y Técnico de Asesoramiento⁴² (STAC, “Scientific and Technical Advisory Committee”, por sus siglas en inglés) compuesto por diez expertos de renombre internacional, encargados de analizar y tomar decisiones relevantes para el proyecto. Adicionalmente, como propuesta del Comité Borja de involucrar a empresas mexicanas, se forma un comité de supervisión de ingeniería que se encarga de los principales contratos suscritos con compañías mexicanas: el Comité de Supervisión de Ingeniería⁴³ (EOC, Engineering Overseeing Committee).[6]

En 1996 la UMass decide contratar a la empresa Toronto Iron Works Systems Inc⁴⁴(TIW) para realizar los diseños conceptuales y preliminares del GTM. La empresa tenía experiencia en el ámbito, ya que antes se encargaban del diseño y construcción de los telescopios óptico-infrarrojo Keck⁴⁵ en Hawái. Es también durante el mismo año que se delibera sobre el sitio en el cual se localizaría el GTM, pero es un proceso tardado que provoca un retraso en los tiempos estipulados inicialmente. Finalmente, en 1997 se decide que el GTM se ubicaría en el Volcán Sierra Negra, después de considerar alrededor de 163 posibles lugares en el territorio nacional; se determina que, a pesar de no contar con la infraestructura de caminos, eléctrica ni de comunicaciones, su altitud de 4580 m, y otras características de las cuales

⁴¹ Grupo creado con el fin de dirigir el proyecto de construcción, planeación y ejecución del GTM.

Convocaban a grupos de expertos especializados en temas específicos para la toma de decisiones.

⁴² Comité creado por el EMT conformado por 10 miembros del más alto nivel mundial para el análisis y toma de decisiones relevantes del proyecto.

⁴³ Grupo de ingeniería que supervisa los principales contratos suscritos con empresas de México en ese momento.

⁴⁴ Proveedor integral que abarca desde el diseño interno hasta la fabricación, el transporte, la instalación y la puesta en servicio. Con más de 50 años de experiencia en el suministro de soluciones y servicios de transferencia de calor de la más alta calidad, TIWW es líder en la industria con una de las instalaciones de fabricación más grandes del oeste de Canadá.

⁴⁵ Los telescopios gemelos del Observatorio W. M. Keck son los telescopios terrestres ópticos e infrarrojos más productivos científicamente del mundo.

hablaremos en el apartado 1.3., son las mejores para la observación milimétrica del GTM. [6]

Con esto en mente, el INAOE decide licitar el análisis del costo de construcción, en el cual la empresa mexicana DIRAC⁴⁶ determina un costo de 100 millones de dólares, y ello provoca que el INAOE se adjudique la responsabilidad definitiva del diseño del GTM. Después de hacer la licitación internacional, el INAOE determina que la empresa alemana MANN Technologie⁴⁶ será la encargada de elaborar el diseño del GTM, el cual sería pagado con fondos mexicanos. A pesar de que se incitara la participación del Instituto de Ingeniería de la UNAM en dicha licitación, por falta de experiencia en el ámbito, el Instituto de Ingeniería decide declinar la participación en el proyecto. La decisión de qué empresa licita el diseño la tomó el Comité Wilson, encabezado por el Premio Nobel Robert Woodrow Wilson⁴⁷ (1936-), y 70 expertos más de todo el mundo [6].

Lo anterior causó descontento en la UMass ya que ellos ya habían contratado a la empresa TIW y se había realizado un diseño preliminar con ellos. UMass advirtió al INAOE con abandonar el proyecto, pero esta institución mexicana no le dio importancia. El 30 de junio del mismo año se presenta ante el INAOE el diseño del GTM, y con ello se extendieron por 2 años las decisiones conceptuales, con la participación de los expertos más reconocidos a nivel mundial [6].

La obra civil del GTM se llevó a cabo entre los años 1998 y 2006. En este periodo surgieron adversidades que retrasaron el proyecto de construcción del Telescopio. El EOC se encargó mayormente de todo, desde las licitaciones de diversas etapas del proyecto, así como la operación diaria de las obras de construcción. La toma de decisiones del comité causó muchas discrepancias y retrasos, pero debido a sus buenos resultados y buenas relaciones con las empresas y la comunidad astronómica, es que siguen al frente en la toma de decisiones [6].

En el 2004 desaparece el EMT y se crea una nueva entidad que se hará cargo de todo: el Observatorio del Gran Telescopio Milimétrico. Sin embargo, los problemas de financiamiento son constantes a partir del 2001, ya que la Contraloría de la Federación se opone a que la SHCP siga destinando recursos para el GTM directamente del Presupuesto de Egresos de la Federación⁴⁸ (PEF), cosa que se venía haciendo desde 1994. El argumento que dieron fue que se trataba de una obra pública, por lo que se debían modificar los presupuestos y las condiciones financieras originales sobre las que se había acordado llevar a cabo el proyecto. Lo anterior genera un problema entre el INAOE y CONACYT, ya que al sustituir los recursos financieros que salían del PEF, por gastos de obra pública provenientes del Sector

⁴⁶ Dirac es la firma de consultoría pionera en México reconocida por sus altos estándares profesionales, técnicos y éticos, apoya entidades públicas, privadas y empresas concesionarias nacionales e internacionales.

⁴⁷ Físico y radioastrónomo estadounidense. En 1978, ganó el Premio Nobel de Física,

⁴⁸ Indica la asignación, destino y tipo de gasto que el Gobierno mexicano requiere efectuar durante un ejercicio fiscal, es decir un año, para obtener los resultados comprometidos y demandados por los diversos sectores de la sociedad.

Ciencia y Tecnología, los cuales tenían como destino diversos centros públicos de investigación [6].

Para el año 2006, el proyecto del GTM había ocupado 122 millones de dólares a precios corrientes, lo cual elevó el presupuesto inicial a 103.4 millones de dólares, deflactando a precios de 1994. Se piensa que este aumento tuvo que ver con que no se consideraron las características específicas del sitio elegido para construir el GTM. En 1998 se elige a la empresa DIRAC para realizar la obra civil, y tomando como base los estudios de suelo de la Comisión Federal de Electricidad⁴⁹ (CFE), se entrega un presupuesto cinco veces mayor a lo previsto por el INAOE, que era de 20 millones de pesos, el cual estaba basado en los diseños proporcionados por ESSCO, TIW y MANN. Dichos diseños no consideraban las características complejas del suelo en la cima del Volcán Sierra Negra [6].

Los objetivos que se tenían con la creación de este nuevo telescopio eran múltiples; se esperaba que hubiera un incremento en conocimientos tanto científicos como tecnológicos, además de un aumento en el nivel de especialización de varias partes, como, por ejemplo, en infraestructura, investigación y en recursos humanos. Además, se esperaba lograr posicionar a México como uno de los países más competitivos, relevantes y con investigación de vanguardia, que genera tecnología y conocimientos de punta. Finalmente, otro de los objetivos fue generar confianza a nivel global al hacer notar la capacidad de organización, infraestructura, capacidades y conocimiento, para que otros países quisieran seguir desarrollando sus proyectos científicos en conjunto con la comunidad científica mexicana [5.]

1.3. Determinación de la posición geográfica más adecuada para la instalación del GTM.

La Sierra Negra, también conocida como Cerro La Negra, es uno de los picos más altos del centro de México, y fue elegido sede del GTM ya que combina una gran altitud y un contenido de agua atmosférico extremadamente bajo. [7] En febrero de 1997, el EMT seleccionó este sitio para el GTM, entre 163 posibles localidades en México. Aunque esta cumbre, situada a 4560 metros de altura, carecía de infraestructura de caminos, electricidad y comunicaciones, ofrecía las mejores características para la observación milimétrica.[6]

Este sitio se encuentra ubicado en el Parque Nacional Pico de Orizaba, en el municipio de Atzitzintla, Puebla. Su altura de aproximadamente 4.6 km al nivel del mar y su atmósfera con baja concentración de vapor de agua, la hicieron crucial para evitar la absorción de radiación y captar señales de objetos muy lejanos, incluso a 14 000 millones de años luz. [6] La ubicación geográfica del proyecto es estratégica, ya que se encuentra en un punto central del país, facilitando el acceso desde distintas regiones de México. [6]

⁴⁹ Empresa pública de carácter social que provee energía eléctrica, Telecomunicaciones e Internet. Es una empresa productiva del Estado mexicano, propiedad exclusiva del gobierno federal, con personalidad jurídica y patrimonio propio.

El INAOE licitó el análisis de costos de construcción del proyecto presentado por la empresa TIW a la empresa mexicana DIRAC. Las estimaciones iniciales indicaron un costo superior a los 100 millones de dólares, lo que llevó al INAOE a tomar la responsabilidad del diseño crítico del GTM para fomentar la participación de la industria nacional y ampliar las opciones planteadas por TIW. El contrato para el diseño definitivo fue adjudicado a la empresa alemana MANN Technologie, financiado con fondos mexicanos.[6]

El Comité Wilson, encabezado por el Premio Nobel Robert Wilson e integrado por 70 expertos de varios países, seleccionó a MANN Technologie como la empresa ganadora. Otras empresas como VERTEX-USA y SATCOMM se excusaron por falta de capacidad, además de que el Instituto de Ingeniería de la UNAM también declinó la invitación [6].

A pesar de la inconformidad de UMass y su idea de retirarse del proyecto si no se reconsiderara la decisión, el INAOE continuó con el proceso y encargó el diseño conceptual a MANN Technologie. Las discusiones conceptuales dentro del proyecto aprobado se prolongaron por al menos dos años, con la participación de reconocidos expertos invitados [6].

A continuación, vamos a ahondar en los detalles geográficos y técnicos del Volcán Sierra Negra proporcionados por el INAOE en su reporte técnico: RTO 548 en abril del 2003. Todos los datos mencionados se recuperaron de dicho reporte.

El Volcán Sierra Negra fue elegido el lugar más conveniente para construir el GTM debido a que la combinación de su elevada altitud y su extremadamente bajo nivel de agua en la atmósfera que rodea al volcán, provocan que sea un sitio ideal para realizar observaciones astronómicas. Se realizaron investigaciones para determinar el potencial astronómico del sitio para observaciones ópticas y en infrarrojo. El trabajo de investigación se realizó entre octubre del 2000 y mayo del 2002. [7]

Las coordenadas del Volcán Sierra Negra son las siguientes: [7]

- 18°59'06" N 97°18'53" W
- 4580 m de altitud.

Del mismo reporte técnico sabemos las ciudades, poblados y comunidades más cercanas al volcán. Estos datos se obtuvieron entre el 2000-2002, por lo que son datos que varían a la fecha pero que entonces se consideraron para elegir donde construirían el GTM. Los datos fueron los siguientes: [7]

- A 5.39 km se encuentra Texmalaquilla con 1000 habitantes. Dicha comunidad se encuentra a 3100 m.
- A 9 km hacia el sur se encuentra Atzitzintla con 2700 habitantes. Dicha comunidad se encuentra a 2680 m.
- La ciudad más cercana es Orizaba-Córdoba que en conjunto tienen una población de 180,000 habitantes y se encuentra a 40km del Volcán Sierra Negra.
- Otra ciudad relativamente cercana al Volcán es Ciudad Serdán con 30,000 habitantes.

- La ciudad de Puebla se encuentra a 93 km hacia el sur y cuenta con 1,200,000 habitantes.
- A 200 km hacia el Oeste se encuentra la Ciudad de México y la Zona metropolitana con una población de alrededor de 17,500,000.

Otra variable considerada fue la contaminación lumínica que podría afectar las observaciones y se concluyó que, aunque podría que los poblados vecinos tuvieran un crecimiento demográfico, la posibilidad de que dicho desarrollo fuera grande en el futuro era remota. [7]

El verdadero problema para el GTM sería la contaminación de radio, ya que, al ser un radiotelescopio, no se ve afectado por la luz per se. De acuerdo con la revista digital “Astronomy”, los satélites inundan el cielo de ondas de radio, las cuales afectan las observaciones radioastronómicas. [8]

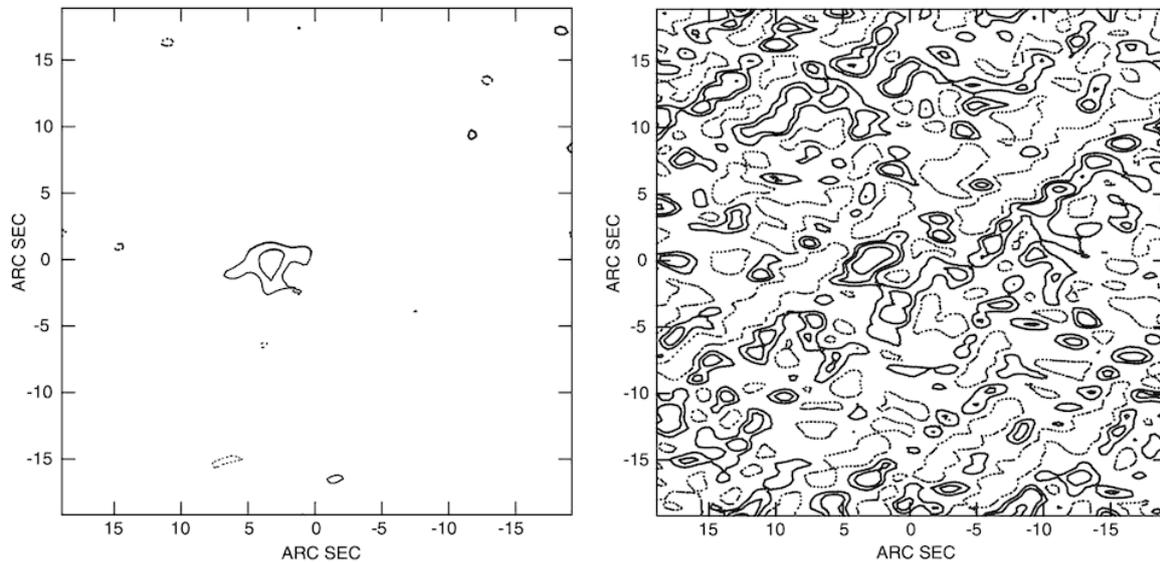
Las señales de radio que llegan a la Tierra desde los objetos astronómicos lejanos son extremadamente débiles: millones o miles de millones de veces más débiles que las señales que utilizan los sistemas de comunicación. Debido a que las fuentes de radio cósmicas son tan débiles, son fácilmente enmascaradas por interferencias provocadas por el hombre. Algunas señales de interferencia más débiles pueden contaminar los datos recopilados por los radiotelescopios, lo cual podría significar que los radioastrónomos hagan interpretaciones erróneas al momento de analizar los datos recabados por los instrumentos radioastronómicos. [9]

Existe un acuerdo internacional en el cual las frecuencias de radio se dividen en bandas designadas para diferentes tipos de usos. Como las estaciones de radio, que pueden estar en la frecuencia AM o FM. Ocurre lo mismo con los canales de televisión, los radios bidireccionales de la policía y los celulares. Así mismo se asignan ciertas bandas de frecuencia a la radioastronomía y por ende, estas bandas están prohibidas para otras industrias. Sin embargo, los transmisores que utilizan frecuencias cercanas a las asignadas a la radioastronomía pueden causar interferencias a los radiotelescopios. Esto ocurre cuando la salida del transmisor es indebidamente “amplia”, desbordándose hacia las frecuencias de radioastronomía. Una de las amenazas principales proviene de los transmisores de los satélites en órbita, ya que estos transmisores están situados en lo alto, que es precisamente hacia donde se apuntan los radiotelescopios. [9]

Para poder erradicar esta problemática, es necesario que exista la cooperación entre la comunidad radioastronómica y las demás industrias que utilizan transmisores de onda de radio. Uno de los ejemplos de este tipo de cooperación fue cuando en 1958 se creó la “Zona Nacional de Silencio Radioeléctrico” (NRQZ, por sus siglas en inglés), la cual buscaba minimizar las interferencias potencialmente dañinas para el Observatorio de Green Bank y para las instalaciones de recepción de radio de la Marina de los E.U.A. en Sugar Grove, ambos en Virginia Occidental. [9]

La NRQZ fue establecida por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, por sus siglas en inglés) el 19 de Noviembre de 1958 y encierra una superficie terrestre de aproximadamente 13,000 millas cuadradas. Este terreno se encuentra cerca de la frontera estatal entre Virginia y Virginia Occidental. [10]

Un claro ejemplo de las consecuencias negativas que puede tener la radioastronomía gracias a las interferencias de radio provocadas por otros transmisores, se puede apreciar en la siguiente imagen.



A la izquierda, una imagen de una estrella obtenida por el VLA. A la derecha, una imagen de la misma estrella obtenida por el VLA cuando un satélite pasó a 25 grados de la posición de la estrella en el cielo. Los datos de la estrella se ven superados por las transmisiones del satélite. [9]

Otras variables climatológicas fueron consideradas en la selección del sitio. Entre ellas se encuentran los estudios siguientes:

- Viento: La dirección en la que sopla el viento en la punta del volcán no tiene una dirección prevalente en la noche o el día ni en la época de lluvia o de sequía. La velocidad del viento es menor que 3m/s el 26.2% del tiempo. Para las velocidades de entre 3 y 9 m/s, se aprecia que los vientos van en dirección norte y noroeste en temporada seca y esto se reduce cuando empieza la época de lluvia. Para los vientos más fuertes de 9 m/s, predomina la dirección norte y noroeste, pero estos vientos fuertes se presentan alrededor de un 10% del tiempo. [7]
- Temperatura: Los valores estadísticos obtenidos muestran que existen variaciones pequeñas en la media de la temperatura, con temperaturas constantes durante la noche y con un aumento mínimo durante el día. La temperatura promedio obtenida en este reporte técnico fue de 0.9C, teniendo un promedio de 2C en el día y 0.3C en la noche. Los días más fríos y calientes reportaron una temperatura máxima de -5.2C y 6.3C respectivamente. Las noches más frías y calientes rodearon los -8.4C y los 3.3C. [7]
- Humedad relativa: El reporte indica que durante el 80% de la temporada seca, la humedad es menor al 80%, lo cual indica que las condiciones son óptimas para la observación astronómica. Durante la temporada de lluvias, el 45% del tiempo que dura dicha temporada, la humedad relativa es menor al 80%. [7]

- Presión atmosférica: Los resultados obtenidos para esta sección indican que en promedio la presión atmosférica in situ ronda los 590.3 mbar y, comparando el promedio proporcionado por la NASA, que arrojó 582 mbar, concluyeron que estaban en lo correcto al realizar las mediciones el primero de enero del 2001, 4560 m. [7]
- Abundancia de nubes: La cantidad de nubes que se encuentran en el Volcán Sierra Negra se debe a las nubes de alto y bajo nivel causadas por la neblina y la humedad. En el reporte se menciona una noche fotométrica como aquella en la que se tienen seis horas seguidas sin nubes durante la noche. Las mediciones se hicieron en el periodo de octubre del 2001 a abril del 2002 en el que se obtuvo un promedio de entre 64 y 74% de noches en las que las observaciones astronómicas serían favorables. [7]

Con dicha información, el comité encargado de realizar el reporte técnico: RTO 548 conformado por Esperanza Carrasco⁵⁰, Alberto Carramiñana⁵¹, José Luis Avilés, Omar Yam⁵² y Florencio Luna, concluyó que, después de recolectar 240479 datos en un tiempo de 522751 minutos, las condiciones en el Volcán Negra son mayormente buenas, dadas las temperaturas y los vientos debidos a la altitud del sitio. En sus conclusiones mencionan que la única variable que les preocupa es que la humedad pueda humedecer las superficies reflectivas de los instrumentos de observación, ya que varía un 66% del tiempo durante el verano y un 25% durante el invierno. El volcán Sierra Negra es un buen sitio de observación astronómica tanto como los mejores del mundo. [7]

⁵⁰ Investigadora Titular B, INAOE

⁵¹ Investigador Titular C, INAOE

⁵² Profesor investigador de la Universidad de Quintana Roo

CAPÍTULO 2.

La radioastronomía en México y el Reino Unido.

México tiene una larga historia en el campo de la Astronomía que data de la época prehispánica. Los convenios internacionales para realizar investigaciones con otros países comenzaron en el siglo XIX, uno de ellos fue la Carta del Cielo. En este capítulo nos introduciremos en el contexto institucional mexicano y británico que llevó al convenio establecido con el Reino Unido para el diseño y construcción de un instrumento fundamental para el GTM, conocido como “Collaborative Heterodyne Amplifier Receiver for Mexico”(CHARM, por sus siglas en inglés). Se hace referencia a los antecedentes del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) fundado en 1971 y del Instituto de Astronomía de la UNAM creado en 1967 por ser dos instituciones importantes durante el proceso. Ambas eran las instituciones astronómicas más importantes del país, de ahí el interés de la Universidad de Manchester y el Rutherford Appleton Laboratory por colaborar con éstas para diseñar y construir equipo tecnológico especializado para el GTM, entre ellos el CHARM.

2.1. Nacimiento de la radioastronomía en México.

Así como en el siglo XIX, la colaboración del Observatorio Astronómico Nacional con otros países para llevar a cabo el proyecto de la Carta del Cielo⁵³ presentó diversas complicaciones, lo mismo sucedió con el proyecto del GTM, pero en una escala mucho mayor, pues las demandas económicas, científicas y tecnológicas fueron de mayores dimensiones. En relación con los retos que conllevan los convenios internacionales, sería conveniente iniciar con las palabras de un destacado astrónomo mexicano, el Dr. Luis Felipe Rodríguez⁵⁴ (1948-), investigador del Instituto de Astronomía de la UNAM.

El Dr. Rodríguez comenta que antes de Guillermo Haro⁵⁵ (1913-1988), la ciencia en el país era tortuosa, un ejemplo de ello fue la Carta del Cielo, y luego, la Cámara Schmidt⁵⁶. El diseño de la Cámara Schmidt fue publicado en 1931, y sólo una década después ya México contaba con la más grande del mundo. Subraya que este es un ejemplo inusual de lo que normalmente pasa con la ciencia en México, es decir, que para cuando finalmente se logra conseguir el instrumento deseado para la experimentación, dicho instrumento ya se encuentra semi-obsoleto; lo cual no ocurrió con la Cámara Schmidt en el país, ya que seguía siendo una herramienta muy

⁵³ El programa de la Carta del Cielo tenía dos objetivos fundamentales, hacer un catálogo de todo el cielo que incluyera las magnitudes y las coordenadas de todas las estrellas más brillantes que la magnitud 11.5 y hacer un mapa del cielo que incluyera todas las estrellas más brillantes que la magnitud 15. Estos objetivos requerían del concurso de observatorios situados en distintas latitudes para observar adecuadamente toda la esfera celeste.

⁵⁴ Astrónomo. Pionero de la radioastronomía en México. El conocimiento de los procesos que caracterizan la formación estelar debe mucho a su grupo de investigación.

⁵⁵ Fue un astrónomo, investigador y académico mexicano.

⁵⁶ La cámara de Schmidt, o comúnmente telescopio de Schmidt, es una cámara astronómica diseñada para proveer amplios rangos de vista con aberraciones limitadas.

poderosa e importante. [11] Sin duda es un factor que entorpece el progreso de la ciencia y la investigación en el país, y el GTM no estuvo exento. Sobre esta situación señala lo siguiente:

“...En la actualidad la mayoría de las aportaciones científicas importantes se gestan y ocurren en períodos relativamente cortos que van de 5 a 10 años. La ciencia de alto nivel es muy competitiva y los intervalos de tiempo con que se cuenta para hacer las cosas son breves. Si bien hay contribuciones que parecen salir de la nada y en las que se podría esperar otros diez o veinte años sin que a nadie se le ocurriese hacerlas generalmente hay un clima en el que dos o más grupos de investigadores están detrás del mismo objetivo o bien tienen programas de trabajo que los van a llevar a hacer el mismo descubrimiento con poco tiempo de diferencia.” [11]

Este comentario hace ver cómo los científicos mexicanos comprenden lo difícil que resulta hacer ciencia experimental en México particularmente por los tiempos de espera y de ejecución de los experimentos, así como la necesidad de contar con diversas fuentes de inversión monetaria, y tecnología de punta. Todo esto influyó en el desarrollo de la radioastronomía y la creación del Gran Telescopio Milimétrico.

A finales de 1960, en México se destinaron diversos recursos para aumentar la oferta académica en Astronomía dentro de la UNAM. De contar con aproximadamente 16 astrónomos, se esperaba aumentar a 80. La comunidad astronómica mexicana empezaba a hacerse notar a nivel nacional e internacional, tanto así que los trabajos producidos en el Instituto de Astronomía eran los más citados en la literatura internacional con respecto a la de otros institutos de investigación de México. Finalmente se tenía el personal capacitado que necesitaba el país. Ahora lo que faltaba era un observatorio nuevo ya que el de Tacubaya al estar en el corazón de la Ciudad de México, ya no permitía realizar observaciones debido a la contaminación luminosa, algo parecido a lo que le sucedió a Tonantzintla. Por ello decidieron escalar del Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla⁵⁷ (OANTON) al de Baja California en 1966, en San Pedro Mártir. Haro terminó su puesto de director del Instituto de Astronomía en 1968, y tres años más tarde, en 1971, el presidente Luis Echeverría⁵⁸ decretó la creación del INAOE. Haro fue el principal impulsor del INAOE, y fue tanto su entusiasmo, que logró convencer a varios académicos de la UNAM, de seguirlo al INAOE, lugar donde se haría investigación aplicada y tecnológica de frontera. [12]

En esos años, la mayor parte de la investigación astronómica en el país se enfocaba en los fenómenos ópticos en el espectro electromagnético visible, y no había mucho avance en temas de otros tipos de ondas tales como el infrarrojo, ultravioleta o las ondas de radio. Como Haro dedicó el tiempo a mejorar la plantilla de astrónomos e investigadores en el país, no había nadie en México que estuviera siguiendo las mismas líneas de investigación radioastronómicas de los investigadores norteamericanos. Todo cambió en 1979, cuando Luis Felipe Rodríguez volvió a México después de estudiar su posgrado en el extranjero, con especialización en radioastronomía. Por ello, se le conoce como el primer radioastrónomo mexicano.

⁵⁷ El Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla (OANTON) se encuentra situado en el cerro de Tonantzintla, en el poblado de Santa María Tonantzintla1 municipio de San Andrés Cholula en el estado mexicano de Puebla.

⁵⁸ Fue un abogado, diplomático y político mexicano que se desempeñó como presidente de México del 1 de diciembre de 1970 al 30 de noviembre de 1976.

Junto con Rodríguez regresaron otros radioastrónomos. Entre 1980 a 1986 el Dr. Rodríguez ocupó el cargo de director del Instituto de Astronomía de la UNAM, y fue durante ese periodo de tiempo, que se consolidó la construcción del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir [13].

A partir de ahí, el país ya tenía radioastrónomos, pero faltaba conseguir recursos para hacer experimentos y observaciones, lo que resultó difícil porque la mayoría de los investigadores del país trabajaban principalmente en el espectro visible, y no alcanzaba para todos los proyectos. [13]

Como no existía un radiotelescopio en el territorio nacional, los radioastrónomos hicieron colaboración internacional para acceder a radiotelescopios donde realizar sus investigaciones. Particularmente en la década de 1980, colaboraron con el National Radio Astronomy Observatory⁵⁹ (NRAO) que tenía una filosofía de aceptar y asignarle tiempo de uso de telescopios, a instituciones nacionales y extranjeras de alta calidad. Dicha colaboración permitió que la radioastronomía en México se consolidara y sobreviviera. El Instituto de Astronomía siguió colaborando con el NRAO, mientras el INAOE comenzaba la planeación para construir el Gran Telescopio Milimétrico. [13]

Gracias al Dr. Rodríguez se creó el Instituto de Radioastronomía y Astrofísica, perteneciente a la UNAM. El antes conocido como Centro de Radioastronomía y Astrofísica⁶⁰ (CRyA ahora IRyA), comenzó su actividad en agosto de 1995 y es una de las instituciones científicas más importantes del país. Se distingue por concentrar al grupo de radioastrónomos más grande de México, grupo que en el 2015 realizaba el 70% de las investigaciones en esta área de la astronomía, en todo el territorio nacional. [14]

2.2. El desarrollo de la radioastronomía en el Reino Unido.

Ahora se mencionarán algunos precedentes en la historia del Reino Unido como precursor y líder en la construcción de dispositivos tecnológicos ultra especializados y precisos.

Empecemos con Sir. Edward Appleton⁶¹ (1892-1965), un físico del St. John's College, de la Universidad de Cambridge, que desde 1919 se dedicó a resolver los problemas científicos de la atmósfera, utilizando técnicas de radio principalmente. En 1924 comenzó unos experimentos que probaron la existencia de la ionósfera, siendo el primer objeto detectado gracias a la radiolocalización. Después de eso se dedicó a estudiar otros fenómenos de diferentes capas de la atmósfera, y su ardua labor logró que en 1939 ocupara el puesto de secretario del Departamento de Investigación

⁵⁹ El Observatorio Nacional de Radioastronomía (NRAO) es un centro de investigación y desarrollo financiado con fondos federales de la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, operado bajo un acuerdo de cooperación por Associated Universities, Inc. con el propósito de la radioastronomía.

⁶⁰ Instituto perteneciente a la UNAM que tiene el objetivo de realizar investigación en astronomía de alto nivel e impacto en las áreas de Medio Interestelar, Formación Estelar, Estrellas Evolucionadas, Altas Energías, Dinámica y Estructura Galáctica, Astronomía Extragaláctica y Cosmología.

⁶¹ Fue un destacado físico inglés, premio Nobel de física en 1947 por sus contribuciones al conocimiento de la ionosfera, que condujeron al desarrollo del radar.

Científica e Industrial⁶² (Department of Scientific and Industrial Research) del Reino Unido. En 1947, le dieron el Premio Nobel de Física por sus contribuciones en la física de la atmósfera superior, en especial por el descubrimiento de la capa Appleton. [15]

Durante la Segunda Guerra Mundial aconteció un evento que permitiría posicionar al país dentro de los estudios de las ondas de radio, y fue que, durante ese periodo, James Stanley Hey⁶³ (1909 - 2000) se dio cuenta de que había señales de radio que interferían con los radares, los cuales eran de suma importancia para defender el territorio de bombardeos. Posteriormente se entendería que estas señales provenían del Sol. Fue después de la guerra que, en las universidades del país, se retomó el estudio de dichas interferencias de radio, liderando el campo el astrónomo Martin Ryle⁶⁴ (1918-1984), de la Universidad de Cambridge. [16]

Como consecuencia de ello, la radioastronomía se desarrolló rápidamente en el Reino Unido. Estos acontecimientos llevaron al descubrimiento de los cuásares en 1962-63. Poco después, se estableció que los cuásares debían alimentarse por agujeros negros supermasivos en sus núcleos activos. Stephen Hawking⁶⁵ (1942-2018) definió la inevitabilidad de su formación en un colapso gravitacional. [16]

Por un lado, el equipo de Hey en Cambridge hicieron el mapeo del cielo con una longitud de onda de 5m, y descubrieron en 1946 la primera fuente discreta de emisión de radio, en la constelación de Cygnus. Por el otro, fue un periodo en el que se promovió el diseño de transmisores de radio potentes, receptores sensibles y se mejoraron las antenas de radio. Dichas investigaciones resultaron en nuevas tecnologías que serían explotadas por los pioneros en radioastronomía, siendo los principales líderes en el tema, Martin Ryle en Cambridge, Bernard Lovell⁶⁶ en Manchester y, Joseph Pawsey⁶⁷ en Sídney. [17]

El primer Observatorio que tuvo radiotelescopios en el Reino Unido fue el Jodrell Bank Observatory⁶⁸ en Cheshire, fundado en 1945 por Bernard Lovell, a través del Centro Astrofísico Jodrell Bank, de la Universidad de Manchester para estudiar los rayos cósmicos.

El Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge contaba con un equipo de expertos en su programa de radares, gracias a los estudios de la ionósfera que hizo Appleton, por lo que, Ryle y John Ratcliffe⁶⁹ decidieron volver a Cambridge y con ello dividieron el grupo de investigación de radio, en dos: el grupo encargado de estudiar

⁶² Fue un departamento del gobierno británico responsable de la organización, desarrollo y fomento de la investigación científica e industrial.

⁶³ Fue un físico y radioastrónomo inglés. Con la aplicación específica de la tecnología de radar a la investigación astronómica sentó las bases para el desarrollo de la radioastronomía

⁶⁴ Fue un astrónomo británico galardonado con el Premio Nobel de Física en 1974 junto con Antony Hewish, convirtiéndose en los primeros astrónomos en conseguirlo, por sus trabajos sobre radioastronomía y los púlsares.

⁶⁵ Fue un físico teórico, astrofísico, cosmólogo y divulgador científico británico.

⁶⁶ Fue un físico y radioastrónomo inglés. Fue el primer director del Observatorio Jodrell Bank, de 1945 a 1980.

⁶⁷ Fue un científico australiano, radiofísico y pionero en el campo de la radio astronomía.

⁶⁸ Es un observatorio astronómico que hospeda radiotelescopios, y es parte de la Universidad de Mánchester.

⁶⁹ Fue un radiofísico británico.

la radio ionósfera, y el de radioastronomía, encabezado por Ryle, disciplina que casi no era conocida en esa época. [17]

Dos descubrimientos en la década de 1950 fueron cruciales para el desarrollo de la radioastronomía en el Reino Unido. La naturaleza de la emisión de radio galáctica era la radiación sincrotrón de electrones de alta energía que giraban en campos magnéticos. Una consecuencia fue que las necesidades de energía de algunos de los emisores de radio más luminosos, como Cygnus A, deben ser enormes, unas 10^8 veces más luminosas como emisor de radio que nuestra propia galaxia. El segundo descubrimiento fue que la emisión de radio de Cygnus A no se originaba en el cuerpo de la galaxia. Lo anterior desencadenó que, en 1953, Roger Jennison⁷⁰ y Mrinal Kumar Das Gupta⁷¹ del Observatorio Jodrell Bank, utilizaran técnicas interferométricas para demostrar que la emisión de radio se originaba en dos enormes lóbulos de radio ubicados a ambos lados de la radiogalaxia. Estas observaciones y su interpretación en cuanto a las propiedades de los plasmas relativistas y los campos magnéticos, estimuló a la nueva disciplina de la Astrofísica de Altas Energías. [17]

El futuro en la radioastronomía estaba garantizado, por lo que Ryle comenzó a planear la construcción de un nuevo observatorio, el Observatorio Radio Astronómico Mullard⁷², inaugurado por Sir Edward Appleton en 1957. [17]

De igual manera fue relevante la publicación de los artículos de John Baldwin⁷³ y Peter Warner⁷⁴ en 1977 y 78 sobre la síntesis de apertura sin fases en donde demostraron cómo se podían reconstruir imágenes de síntesis de apertura a partir de funciones de correlación cruzada entre pares de telescopios sin utilizar la información de fase, siempre que la densidad de flujo de una de las fuentes puntuales excediera con creces la de la suma de todas las fuentes más débiles en el campo. Lo anterior sentó las bases de las técnicas de auto calibración, las cuales son vitales para reducir datos en radioastronomía. Otra disciplina naciente fue la radioastronomía milimétrica y submilimétrica. Richard Hills⁷⁵ (1945-2022) regresó al Reino Unido de Alemania y EE. UU. como científico del proyecto del telescopio de 15 metros milímetro/submilimétrico que se llamaría Telescopio James Clerk Maxwell⁷⁶, en donde se estudiarían cuásares con corrimiento al rojo y la formación de estrellas [17]. En el 2007 fue nombrado científico del proyecto ALMA.⁷⁷

⁷⁰ Físico que trabajó como radioastrónomo en Jodrell Bank bajo la dirección de Robert Hanbury Brown. Jennison hizo varios descubrimientos en el campo de la radioastronomía, incluido el descubrimiento de la naturaleza doble de la fuente de radio Cygnus A.

⁷¹ Fue un físico indio que colaboró con Robert Jennison en el descubrimiento de la naturaleza doble de la fuente de radio Cygnus A.

⁷² Está situado cerca de Cambridge, Reino Unido, y alberga varios de los radiotelescopios de síntesis de apertura más grandes y avanzados del mundo, incluidos el One-Mile Telescope, el Ryle Telescope de 5 km y el Arcminute Microkelvin Imager.

⁷³ Fue un astrónomo británico que trabajó en el Cavendish Astrophysics Group (anteriormente Mullard Radio Astronomy Observatory) desde 1954. Desempeñó un papel en el desarrollo de la interferometría en radioastronomía, y más tarde en la interferometría óptica astronómica y la obtención de imágenes

⁷⁴ Físico. Desde 2019 Científico asociado en el Instituto Max Planck de Coloides e Interfaces, Potsdam, Alemania

⁷⁵ Fue un astrónomo británico que fue profesor emérito de Radioastronomía en la Universidad de Cambridge.

⁷⁶ Es un telescopio submilimétrico situado en el monte Mauna Kea de Hawái, a 4092 m de altura, es el mayor telescopio dedicado específicamente a operar en las regiones submilimétricas del espectro.

⁷⁷ Astrónomo británico que impartió clases de radioastronomía en la Universidad de Cambridge.

2.3. El Rutherford Appleton Laboratory.

El desarrollo científico en el área de radioastronomía y radares en el Reino Unido hizo necesaria la creación de una institución que apoye la creación de nueva tecnología y herramientas necesarias para la ciencia.

Diversas instituciones del Reino Unido han sido reconocidas por contribuir a los avances de la ciencia tanto teóricos como prácticos, particularmente en diversas ramas de la Física. Sin embargo, las universidades del Reino Unido no han sido las únicas que han aportado en el desarrollo teórico-tecnológico de la ciencia. Existen otras, como la United Kingdom Research and Innovation⁷⁸, cuyo objetivo es invertir en investigación e innovación para mejorar las vidas de las personas, apoyar el crecimiento de la economía, generar empleos y brindar servicios públicos de alta calidad alrededor del Reino Unido. Dicha organización tiene varias subdivisiones en diferentes ejes de investigación. Sus áreas de especialización van desde tecnologías digitales hasta energía limpia, así como manufacturación, matemáticas, materiales avanzados y hasta química. En particular nos interesa hablar de la subdivisión de Science and Technology Facilities Council⁷⁹ (STFC, por sus siglas en inglés).

La Science and Technology Facilities Council fundó el Rutherford Appleton Laboratory⁸⁰ (RAL, por sus siglas en inglés) como uno de sus laboratorios nacionales de investigación científica, y comenzó como el Rutherford High Energy Laboratory en 1975. Dicho laboratorio se encuentra en el campus Chilton, en Oxfordshire, Reino Unido. Dentro de este laboratorio de altísima importancia para el desarrollo científico del país, se encuentra la división del espacio, la RAL Space, en la que existe un proyecto de investigación llamado ASTEC⁸¹ (Entrenamiento en Sistemas Astronómicos, Ingeniería y Colaboración, por sus siglas en inglés) que a su vez tiene un grupo de trabajo dedicado a la tecnología de las ondas milimétricas (Millimetre Wave Technology Group), en el cual desarrollan tecnología de punta que se utilizan en la radioastronomía y en las ciencias atmosféricas.

El trabajo pionero de RAL en áreas como la física de partículas, la computación científica, el desarrollo de láseres, la investigación espacial y la tecnología aborda algunos de los desafíos importantes que enfrenta la sociedad. Desde 1957 ha existido un laboratorio en Chilton. Hoy en día, aproximadamente 1,200 empleados trabajan en el sitio. [18]

RAL ofrece una variedad de programas de capacitación, incluidos aprendizajes en ingeniería y prácticas de verano para estudiantes. Estos programas ayudan a atraer

⁷⁸ Agencia de financiación nacional que invierte en ciencia e investigación en el Reino Unido. UKRI opera en todo el país con un presupuesto combinado de más de 6 mil millones de libras y reúne a los 7 Consejos de Investigación, Innovate UK y Research England.

⁷⁹ Institución que apoya la investigación en astronomía, física y ciencia espacial y opera instalaciones de investigación de clase mundial para el Reino Unido.

⁸⁰ Es uno de los laboratorios de investigación científica del Science and Technology Facilities Council. Ubicado en el campus Harwell de Ciencia e Innovación, en Chilton, Reino Unido.

⁸¹ El proyecto cuenta con el apoyo de un fondo del Fondo de Investigación de Desafíos Globales (GCRF) con el objetivo de desarrollar vínculos con investigadores mexicanos y a través de la colaboración, capacitarlos en el desarrollo y uso de receptores heterodinos de alta frecuencia.

a los jóvenes a las ciencias, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas (STEM), lo cual es vital para el futuro de la economía del Reino Unido. [18]

El RAL Space realiza investigaciones científicas y desarrollos tecnológicos de clase mundial con una participación significativa en más de 210 instrumentos en misiones hasta la fecha. Como parte integral del Science and Technology Facilities Council (STFC, por sus siglas en inglés). RAL Space es el centro espacial para la Investigación e Innovación del Reino Unido. Trabajan con agencias del Reino Unido y del extranjero, universidades y empresas en proyectos espaciales y terrestres relacionados con el espacio. [19]

RAL Space tiene más de 60 años de experiencia y conocimiento en programas espaciales. Cuentan con expertos que trabajan a lo largo del ciclo de vida de las misiones espaciales:

- liderando estudios conceptuales para futuras misiones
- desarrollando instrumentación científica innovadora y personalizada
- proporcionando instalaciones de prueba espaciales y terrestres
- operando estaciones terrestres
- procesando y analizando datos.

La tecnología de RAL Space se utiliza para ayudar a monitorear y comprender la salud y los procesos de la Tierra, así como para explorar nuestro sistema solar y el universo más allá. Ofrecen experiencia en sistemas electrónicos y de imágenes, tecnología de ondas milimétricas, espectroscopía y radiometría, incluidos servicios de calibración. El trabajo que realizan es respaldado por capacidades técnicas y de fabricación, incluyendo fabricación de precisión para tecnología de ondas milimétricas y aislamiento multicapa. [19]

Capítulo 3.

Precedentes tecnológicos e institucionales del CHARM.

3.1. El Global Challenges Research Fund (GCRF).

El Reino Unido cuenta con un programa de apoyo a la investigación de vanguardia en países en desarrollo, llamado el Global Challenges Research Fund⁸² (GCRF por sus siglas en inglés, o Fondo de Investigación de Desafíos Globales), el cual se enfoca en los objetivos de desarrollo sustentables creados por la ONU, en el cual se busca maximizar el impacto de la investigación y la innovación dentro de los diversos países en desarrollo, para así poder mejorar las oportunidades de las personas y con ello el desarrollo del mundo. [20] Debido a que la organización se enfoca en ayudar a los países en desarrollo, tiene dentro de su organización al Fondo Newton, que ayuda a construir asociaciones de investigación e innovación para poder lograr los objetivos de la GCRF, y lo logra gracias a que concreta asociaciones equitativas con los países, igualmente logra crear acuerdos basados en las estrategias nacionales para el enfoque de la investigación multidisciplinaria, y finalmente se encarga de fomentar el talento y carreras que tengan capacidad de desarrollo. [21]

Así se concretó esta asociación de investigación entre ambos países, donde el proyecto ASTEC buscó capacitar a astrónomos mexicanos en las técnicas de radio de altas frecuencias necesarias para construir receptores utilizados en el GTM. Dicha capacitación se llevó a cabo mediante la conversión de un receptor llamado SHIRM⁸³ (Sub Harmonic Image Rejection Mixer, Mezclador de rechazo de imagen subarmónico, por sus siglas en inglés) del cual hablaremos más adelante. El proyecto tenía también como objetivo que, al enseñarles dichas técnicas a investigadores mexicanos, también se podían aplicar en otras áreas comerciales y de investigación como en el monitoreo atmosférico y en la industria automotriz incluso, por dar algunos ejemplos. [22]

El UKRI (United Kingdom Research Institute, por sus siglas en inglés) planteó que el proyecto bilateral creara un fuerte liderazgo técnico y científico entre el Reino Unido y México, benéfico para ambas comunidades científicas y técnicas conjuntas. El proyecto permitiría a México maximizar el regreso de capital científico, técnico e inspirador del Gran Telescopio Milimétrico (GTM), y también impulsaría otras áreas como tecnología, ya que la tecnología THz (Heterodyne terahertz) es vital para respaldar las sondas meteorológicas de próxima generación y los experimentos de modelización climática; dicha tecnología es de una alta importancia para diversos sectores como son el transporte, la agricultura, la predicción y gestión de desastres relacionados con el clima, los seguros y sectores bancarios. [22]

⁸² El Fondo GCRF apoya la investigación de vanguardia para abordar los desafíos que enfrentan los países en desarrollo. El Fondo aborda los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas y busca maximizar el impacto de la investigación y la innovación para mejorar las vidas y las oportunidades en el mundo en desarrollo.

⁸³ Tipo de receptor que contenía un mezclador de rechazo de imágenes bombeado subarmónicamente, que fue desarrollado para ser utilizado como un concepto de instrumento para futuras misiones espaciales RAL.

3.2. SHIRM.

Como ya se mencionó, el UKRI es uno de los principales impulsores de nuevas tecnologías y del avance científico en el Reino Unido con la capacidad de financiar proyectos de colaboración a nivel internacional. El STRC (Science and Technology Research Council, por sus siglas en inglés) es una de las dependencias institucionales pertenecientes al UKRI, y asimismo, el Rutherford Appleton Laboratory (RAL) es un organismo dependiente del STFC, por ende, del UKRI. Ahora, dentro del RAL, ubicado en el campus Harwell de Ciencia e Innovación, en Chilton, Reino Unido, existen muchos grupos de investigación y de experimentación, pero para los fines de nuestro estudio, nos enfocaremos en el Grupo de Tecnología de Ondas Milimétricas (Millimetre-Wave Technology (MMT) Group, MMT por sus siglas en inglés).

El Grupo de Tecnología de Ondas Milimétricas (MMT - Milimeter Technology Group) cuenta con instalaciones únicas para el diseño, fabricación y prueba de componentes y sistemas de receptores submilimétricos. Los ejemplos de las capacidades del grupo van desde mezcladores y multiplicadores de frecuencia, pasando por fuentes de fotomezcladores y polarizadores de rejilla de alambre, hasta sistemas de radiómetros criogénicos autónomos. Las habilidades de diseño, ensamblaje y prueba de clase mundial se complementan con las Instalaciones de Desarrollo de Precisión (Precision Development Facility) y un laboratorio dedicado al procesamiento de semiconductores. El Grupo de Tecnología de Ondas Milimétricas ha trabajado en muchos proyectos desarrollando instrumentos y componentes para vehículos terrestres, aéreos y misiones espaciales. [23]

En el 19vo Simposio Internacional sobre Tecnología Espacial de Terahercios⁸⁴ se presentó un artículo llamado “Development of a 340-GHz Sub-Harmonic Image Rejection Mixer Using Planar Schottky Diodes”, hecho por Bertrans Thomas, Simon Rea, Brian Moyna y Dave Mathson, como una colaboración entre el RAL, la NASA-JPL y el EADS-ASTRIUM Ltd. A dicho dispositivo, que en español se traduce como “Mezclador de rechazo de imagen subarmónica de 340-GHz usando diodos Schottky planos”, le dieron el nombre de SHIRM, por sus siglas en inglés. De acuerdo con el artículo, las observaciones de la atmósfera terrestre en el “limb” (también conocido como “horizonte”) mediante ondas submilimétricas transportadas por el espacio, pueden proporcionar información única sobre la distribución global de especies moleculares clave en la tropósfera superior y la estratósfera inferior. [24]

El artículo menciona que, para poder resolver las emisiones en el horizonte, debido a las líneas rotacionales y vibratorias de la tropósfera, es necesario poder separar las bandas laterales del receptor. A la par, en la radioastronomía se habían desarrollado mezcladores eficientes para separar bandas laterales SIS, elegidos como arquitectura genérica para la mayoría de las bandas receptoras de ALMA, de 100GHz a 700GHz. Cuando desarrollaron el SHIRM, no se había aplicado ese enfoque a mezcladores de diodos de Schottky, para ese rango de frecuencias. [24]

⁸⁴ Evento efectuado en la ciudad de Groningen, Países Bajos. El evento se llevó a cabo del 28-30 de abril del 2008.

Utilizando diodos semiconductores pHEMT en la Q-banda, fue que se desarrolló con éxito el dispositivo SHIRM, integrado de 300-360GHz. [24]

El dispositivo fue desarrollado con apoyo del Centro para Instrumentación de Observación Terrestre del Reino Unido (Centre for Earth Observation Instrumentation, CEOI, por sus siglas en inglés), y sirvió para demostrar el potencial de futuros instrumentos espaciales basados en el concepto del SHIRM. En 2014, el dispositivo fue desplegado por el MMT en un ensayo de campo en el Observatorio Sphinx, en Jungfrauoch, Suiza. [25]

El SHIRM regresó a su hogar en el Reino Unido después del proyecto con el CEOI, y se quedó en desuso por algunos años (2014-2018). Fue hasta el 2018 que, el Dr. Gary Fuller, astrónomo de la Universidad de Manchester, le propuso al Dr. Brian Ellison, que en ese momento fungía como director del MMT, que se utilizara el SHIRM para el GTM.

Capítulo 4.

Convenio de colaboración entre el Rutherford Appleton Laboratory, la Universidad de Manchester y el INAOE para el diseño y construcción del CHARM, y su instalación en el GTM.

Este capítulo es el más importante y de gran valor científico e histórico pues a través de entrevistas con los científicos involucrados (anexadas al final de la tesis) en el diseño y construcción del equipo técnico requerido para el GTM, se logró reconstruir el proceso de colaboración entre el Rutherford Appleton Laboratory, la Universidad de Manchester y el INAOE. En particular, se hace referencia a los motivos científico-tecnológicos que llevaron a la integración del RAL en el convenio de colaboración, así como el grupo de científicos que colaboraron en ello. Se menciona la participación del científico mexicano responsable ante el INAOE de instalar el CHARM en el GTM y de lograr su buen funcionamiento. Se señalan los problemas e inconvenientes a los que se enfrentó el equipo de trabajo nacional e internacional para poner en operación el CHARM (técnicos y financieros, de salud pública con la pandemia de COVID-19 y con la delincuencia organizada al momento de transportar el equipo por carretera). A pesar de las vicisitudes técnicas, sociales y de salud pública, los resultados fueron favorables.

4.1. Colaboración entre los equipos de investigación mexicano y británico para la creación del CHARM.

Para entender cómo tuvo lugar la colaboración entre México y el Reino Unido, y sobre todo entre instituciones que al interior de cada país eran las de mayor relevancia a nivel nacional, es conveniente conocer cómo se vincularon las siguientes instituciones: la Universidad de Manchester, el Rutherford Appleton Laboratory (RAL), el GTM y el INAOE a través de proyectos radioastronómicos basados en la tecnología de ondas milimétricas. El primer vínculo entre las tres últimas lo encontramos en el Dr. Gary Fuller, quien colaboró con el RAL para poder llevar al CHARM al GTM en el 2019. El proceso lo reconstruí gracias a diversas entrevistas que realicé a la Dra. Eimear Gallagher, al Dr. Edgar Colín Beltrán, al Dr. Brian Ellison y al mismo Dr. Gary Fuller.

De acuerdo con el Dr. Brian Ellison, en ese momento director del grupo de ondas milimétricas (MMT) del RAL, el Dr. Gary Fuller lo contactó para platicarle del programa del GCRF, el cual buscaba promover la enseñanza de conocimiento técnico-científico en países en vías de desarrollo. El Dr. Fuller tenía conocimiento de los instrumentos que había en el RAL, pues había colaborado con el Dr. Ellison años atrás y había logrado un buen intercambio de conocimiento por un tiempo largo. En el grupo de ondas milimétricas del RAL, se había desarrollado el dispositivo SHIRM unos años antes. El Dr. Fuller que también tenía contacto directo con el director del GTM, Dr. David Hughes, vio como una gran oportunidad la convocatoria del GCRF donde se planteaba realizar una colaboración internacional con algún país en vías de desarrollo, para transmitir conocimiento tanto teórico como técnico. Dicho programa llevó el nombre de ASTEC (“Astronomical System Training, Engineering and Collaboration”, en español “Entrenamiento en sistemas astronómicos, ingeniería y colaboración”). A dicho programa se le dio un presupuesto de £74,214, que aproximadamente son \$1,940,725 mxn. al tipo de cambio de hoy (27 agosto 2024). [26]

El programa buscaba contribuir a la formación de astrónomos mexicanos en las técnicas de radio de alta frecuencia necesarias para construir receptores que se utilicen en el GTM. Dicha formación se llevaría a cabo mediante la conversión de un receptor "SHIRM" existente que se utilizaba anteriormente para observaciones de la Tierra para su uso en el GTM para observaciones astronómicas. Las habilidades transferidas a la comunidad

mexicana durante ese proyecto tienen el potencial de una amplia aplicación en otras áreas comerciales y de investigación que tienen un impacto directo en el desarrollo del país. Entre los ejemplos se incluyen la vigilancia atmosférica y del uso del suelo, y sensores activos en una variedad de aplicaciones, entre ellas en automóviles, un área en la que México tiene un gran sector manufacturero. [26]

El Dr. Edgar Colín Beltrán, ingeniero mexicano egresado del INAOE se encontraba trabajando en el INAOE, y al ser uno de los pocos científicos mexicanos que contaba con conocimientos avanzados de electrónica enfocados a la instrumentación astronómica, fue seleccionado para participar en dicho proyecto de cooperación desde la parte mexicana.

El plan era utilizar los componentes del SHIRM para crear un dispositivo de características similares que sirviera para acoplarse al GTM, y determinar la precisión del radiotelescopio. Como todo el grupo de trabajo se encontraba en el Reino Unido, el Dr. Colín se trasladó a dicho país para colaborar en el diseño y construcción del nuevo dispositivo, el CHARM. Como responsable del Reino Unido y el encargado del grupo de trabajo fue nombrado el Dr. Fuller. Él instruyó a los integrantes del equipo sobre las especificaciones que debía tener el CHARM, para su correcto funcionamiento astronómico. El Dr. Fuller fue designado como investigador principal en el proyecto. El Dr. Stan Kurtz del IRyA, UNAM fue designado como co-investigador a la par del Dr. Edgar Colin. [26]

Para entender cómo trabajan en el RAL, el Dr. Fuller me dio la oportunidad de visitar el laboratorio, el 15 de febrero del 2024. Ahí tuve la oportunidad de platicar con el Dr. Nart Daghestani, quien me enseñó las instalaciones del grupo MMT dentro del edificio de RAL Space. Me comentó que, en sí, las personas que laboran en el RAL, son mayormente técnicos, que están especializados en electrónica, óptica, entre otras cosas, pero que, en pocas palabras, el grupo MMT solamente recibe indicaciones de qué tipo de dispositivo deben crear, para qué va a servir y en dónde se va a usar, y con eso, comienzan a desarrollar dispositivos nuevos. A mi parecer, eso también es ser científico, porque, aunque tal vez no tengan una formación formalmente científica, definitivamente son mentes brillantes que tienen un vasto y amplio conocimiento aplicable con el cual, desarrollan tecnología de punta.

En el Reino Unido existe la oportunidad de trabajar por un año en una empresa relacionada con tu carrera universitaria, a ese año le denominan “placement work”. Es una oportunidad para que antes de terminar su licenciatura, los estudiantes puedan experimentar cómo es el ambiente laboral, e igualmente, averiguar si cierto trabajo es lo que realmente quieren hacer después de graduarse [27]. Así fue como, la Dra. Eimear Gallagher, un año antes de graduarse (Jun 2020 - Sep 2020) de la Universidad Nottingham Trent, hizo su placement year en el RAL.

La Dra. Gallagher tenía mucha experiencia experimental gracias al programa de estudios tan práctico de su universidad, por lo que, a mi parecer, fue una colaboradora ideal para el CHARM. Ella comenzó a trabajar en el RAL en el 2018. Sin embargo, desde antes de que se uniera, ya se tenía “en papel” el proyecto de CHARM. Para cuando ella se integró al equipo MMT, la mayoría de la comunicación entre el RAL y México era directamente con el Dr. Colín.

Durante el mes de octubre del 2018, la Dra. Gallagher, Nart Daghestani y otro de sus colegas fueron a visitar el GTM, para poder darse una idea de dónde iba a colocarse el CHARM. Fue allí donde tuvieron el primer acercamiento con la comunidad científica del INAOE, incluyendo al Dr. Colín, quien había regresado ese mismo año unos meses antes.

Mientras estaban en el GTM, la Dra. Gallagher, el Dr. Nart y el Dr. Colín se dedicaron a realizar mediciones en el cuarto de instrumentación, que es donde todos los experimentos

que se están realizando en el radiotelescopio, tienen sus componentes; por eso se tomaron la tarea de realizar las medidas pertinentes para saber con certeza cuánto espacio tenían disponible para que, en la siguiente visita, instalaran el CHARM. Sin duda fue una labor complicada, especialmente a la altitud a la que se encontraban. Fue después de esa visita preliminar, que todos los investigadores británicos regresaron al campus del RAL, a poner manos a la obra para construir el CHARM.

Posterior a la visita del equipo británico a Puebla, fue el turno del Dr. Colín de visitar Inglaterra. Él vivió en el Reino Unido por algunos meses, en donde recibió el entrenamiento técnico que se acordó en el convenio. No recibió clases per se, más bien, tuvo que poner manos a la obra y aprender de la experimentación de primera mano. Se involucró profundamente en el proyecto, tanto que él hizo los modelados en el programa de diseño conocido como CAD del CHARM, y aprendió de la nueva tecnología desarrollada en el RAL. Aunque existen dispositivos similares al CHARM, lo innovador es que puede trabajar a temperatura ambiente y que observa una frecuencia particular de 345GHz, lo que provoca que se amplíe el repertorio del GTM, y así, proporciona información nueva que antes no podía hacer.

4.2. Contratiempos en la instalación y el buen funcionamiento del CHARM en el GTM.

En la primera visita preliminar al GTM, el equipo de investigadores británicos se dio cuenta de que para poder desempeñar sus labores científicas en el observatorio, era necesario coordinar la subida del personal y del equipo al Cerro junto con las autoridades locales, ya que en ese momento la inseguridad en el estado de Puebla era preocupante e incluso existe un artículo de la revista *Nature* [28], que explica que tan contraproducente fue para la ciencia en México en ese entonces, el hecho de verse envuelta en la inseguridad de un país. Para ser precavidos y evitar algún tipo de incidente que impidiera que se llevaran a cabo las tareas en el GTM, el Dr. Colín y el Dr. Nart me contaron que tenían asignado a un oficial que los acompañaba en especial durante la noche, pero nunca les pasó nada afortunadamente. La altitud fue otro factor a considerar, ya que para cualquier persona que no está acostumbrada a la altitud, el tener que trabajar a 4,600 m. es sin duda un reto que vencer. De acuerdo con el Dr. Nart, el trabajar a esa altura se volvió una tarea muy compleja, e incluso él mismo llegó a necesitar de oxígeno al estar en el GTM. Sin embargo, creo que muchas veces la ciencia nos ha llevado a experimentar en lugares recónditos de la Tierra, como en la Antártida donde las temperaturas en promedio son de -57C. o hablando de otro Observatorio, el ALMA seguro que representa un reto parecido, al encontrarse en el desierto de Atacama en donde la temperatura en verano alcanza los 45C.

Cuando finalmente ya tenían listo el nuevo dispositivo, fue momento de tramitar el carné para realizar la exportación temporal a México. De acuerdo con la página web de la Agencia Nacional de Aduanas, se puede tramitar para Exportación e Importación Temporal de Mercancías mediante un documento llamado "Cuadernos ATA". [29]

Dicho Cuaderno ATA sirve para:

- Participar en ferias y exposiciones: "Convenio Aduanero relativo a las facilidades concedidas a la importación de mercancías destinadas a ser presentadas o utilizadas en una exposición, una feria, un congreso o una manifestación similar".
- Productos para muestras comerciales: "Convenio internacional para facilitar la importación de muestras comerciales en materia de publicidad".
- Equipo profesional: prensa, radio, cine, instalaciones técnicas, teatro, acontecimientos deportivos...etc.: "Convenio aduanero para la importación temporal de equipo profesional".

El precio de dicho carné, al menos al 23 de marzo del 2024, tenía un costo de \$9,600.00 MXN más IVA. El carné tiene vigencia de un año. [29]

La Dra. Gallagher fue la encargada de tramitar el permiso, y por lo que me contó, fue muy difícil de coordinar ya que tenían un agente de aduanas que les ayudó con el proceso, pero eso no quitó que fuera demasiada burocracia y mucho papeleo. Ella cuenta que cuando finalmente todo estaba listo, en el verano del 2019, para enviar el CHARM a México, se les presentó otra complicación que casi arruina todo el proyecto, y es que cuando llevaron al CHARM a Heathrow, el aeropuerto de Londres, el dispositivo tenía como destino la Ciudad de México, cosa que no sucedió. El CHARM se tomó unas merecidas vacaciones en Cancún, lugar al que fue enviado, y de allí fue llevado hasta Puebla, en camión. Cuando se enteraron de lo acontecido, entraron en pánico, ya que al ser un dispositivo sumamente sensible y con muchas partes que lo conforman, era muy probable que, si no se transportaba con sumo cuidado, se podría dañar. Afortunadamente llegó a Puebla sano y salvo, y después de hacerle una exhaustiva revisión, concluyeron que no había sufrido ningún daño y que tampoco se había descalibrado.

Fue entonces que comenzaron la instalación en el GTM. Pasaron varios días trabajando sin parar para poder acoplar ópticamente al CHARM con el GTM, y debido a que había otros proyectos a la par, el poder trabajar sin afectar o interferir con los demás experimentos fue otro factor a considerar. El proyecto que se estaba desarrollando a la par en el GTM es el proyecto ToI TEC. El proyecto tenía como objetivo el realizar grandes mapas del cielo de manera muy rápida que permitan rastrear la formación estelar en la Vía Láctea, estudiar sus campos magnéticos, y realizar exploraciones ultra-profundas que localicen galaxias en los confines del Universo. Por ello un equipo de científicos de México, Estados Unidos y Gran Bretaña se encontraban trabajando desde el 2016, en una cámara multicolor polarimétrica con tecnología de última generación para el GTM. Fue desarrollado por la Universidad de Massachusetts Amherst (UMass) en conjunto con el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), las universidades Estatal de Arizona, del Noroeste, de Michigan y de Wisconsin, el National Institute of Standards and Technology de Estados Unidos y la Universidad de Cardiff en Gales, Gran Bretaña. Se planeaba su instalación a finales del 2018. [30]

En septiembre de 2019, CHARM fue instalado en el GTM.

Es relevante señalar que los mejores meses para realizar observaciones en el GTM son entre noviembre a enero. Cuando empezaron las observaciones con el CHARM ya instalado, fue en septiembre, lo cual provocó que, al no ser el mejor mes para realizar observaciones, no se obtuvieron muchos resultados. Sin embargo, después de tres semanas de trabajo conjunto de los investigadores del RAL y el Dr. Colín, fue momento de que el equipo británico volviera a casa. El Dr. Colín se quedó trabajando en el GTM, pero menciona que fue difícil ya que nuevamente por la inseguridad, solamente podía subir al Cerro a trabajar de lunes a viernes, lo cual, al solamente tener tres meses de condiciones ideales para trabajar, reduce las horas que se pueden utilizar en el GTM.

Para este momento, el fondo de ayuda del GCRF ya se había terminado, y no sólo eso, sino que la pandemia del COVID-19 empezó. La página oficial del GTM lanzó un comunicado fechado en Julio 28, 2021, titulado "Estado actual del GTM y preparación para el retorno a operaciones científicas considerando el COVID-19". [31]

El comunicado dice lo siguiente:

"En marzo de 2020, el Gran Telescopio Milimétrico cesó todas sus operaciones científicas debido a la pandemia de COVID-19 y actualmente el telescopio permanece cerrado. Durante los últimos 16 meses, se ha

podido realizar un número limitado de visitas al sitio del LMT, principalmente para realizar inspecciones del telescopio y la infraestructura del sitio y para realizar cualquier mantenimiento urgente y esencial del telescopio y la carretera de acceso. También hemos tenido oportunidades ocasionales de encender los sistemas primarios del telescopio y mover brevemente el LMT tanto en el eje de acimut como en el de elevación. La noticia alentadora es que no hemos encontrado fallas o problemas importantes con el telescopio y el equipo de apoyo. Sin embargo, el impacto de la pandemia de COVID-19 en curso continúa afectando nuestro cronograma para volver a una rutina normal de operación científica y mantenimiento del telescopio, lo que resulta en retrasos significativos e incertidumbre en la fecha de inicio de la temporada de observación 2021-S1, originalmente programada del 16 de marzo al 15 de septiembre de 2021.

Dada la situación actual, la administración del LMT está considerando una extensión de la temporada de observación actual 2021-S1 más allá de septiembre de 2021 que incluirá una oportunidad para instalar y poner en funcionamiento nuevos instrumentos científicos, incluida la cámara de continuo de múltiples longitudes de onda TolTEC, y también llevar a cabo un programa de ingeniería para continuar mejorando la alineación del reflector primario segmentado y aumentar el rendimiento del telescopio en las longitudes de onda operativas más cortas (~1 mm).

Por último, nos gustaría informarle que estamos preparando los materiales y la información necesaria para respaldar una nueva convocatoria de propuestas para el LMT que se publicará en un futuro próximo. Tras la conclusión del programa científico 2021-S1, se prevé que la próxima temporada de observación se extienda desde finales de 2021 hasta el otoño de 2022.” [31]

Es claro que el acceso al GTM estaba limitado y, sobre todo, que los experimentos que se estaban llevando a cabo, se tuvieron que pausar.

Al tener una pandemia mundial tan crítica, en donde todos tuvimos que cambiar nuestro estilo de vida, reacomodar nuestros planes a futuro, e incluso buscar estar sanos y salvos, la ciencia tuvo que tomar riendas en el asunto de igual manera. El GTM pausó sus operaciones y el CHARM, que debía regresar al Reino Unido antes de que expirara el carné anual, se quedó in situ. De hecho, de acuerdo al RAL, hoy en día sigue en Puebla, en las instalaciones del INAOE o del GTM, y no ha podido regresar a su país de origen; aunque los investigadores del RAL, son conscientes de ello, ha sido una labor complicada de hacer, ya que en el 2021 el director del MMT, el Dr. Brian Ellison, se retiró, la Dra. Gallagher siguió con sus estudios en Alemania, el Dr. Colín se mudó a Escocia y el Dr. Nart, aunque sigue trabajando en el RAL, no tiene la autoridad suficiente para realizar dicho trámite.

El Dr. Colín menciona en su entrevista que hace unos meses, alrededor de abril de 2024, recibió un correo por parte de unos excolegas de GTM para saber detalles de la importación del CHARM, ya que sería devuelto al RAL pronto, pero no tiene más detalles al respecto.

Así como el SHIRM tardó un par de años en encontrar otro proyecto de vida y evolucionar al CHARM, esperamos que el CHARM tenga esa misma oportunidad en el futuro; donde su innovadora tecnología pueda transformarse hacia un nuevo propósito en el cual enfocar todo su poder, capacidad y precisión.

Uno de los posibles futuros para el CHARM se pensó que fuera mantenerlo en GTM y mejorar el mezclador en términos de reducción de ruido cambiando el diodo Schottky por uno más moderno, aparte del diseño de un pequeño Dewar que contuviera la corneta de entrada y el mezclador, con el objetivo de bajar el ruido a niveles entre la mitad y un tercio del actual. Con respecto al telescopio, este aparato hubiera podido caracterizar la ganancia de antena del telescopio con respecto a la elevación, en rango submilimétrico, aunque éste no fuera su objetivo inicial.

4.3. Avance y resultados del CHARM en el GTM.

De acuerdo con el paper "CHARM: a room-temperature 345GHz receiver for the Large Millimeter Telescope", los resultados que obtuvieron al utilizar el dispositivo fueron los siguientes:

- En la primera noche, las condiciones meteorológicas eran marginales para la astronomía de submilimétricos con una opacidad en el cenit de $225\text{GHz}=0.11$. Como se presenta en la sección 4, el telescopio fue apuntado al disco lunar. Esto confirmó la sensibilidad del receptor a la radiación astronómica y nos permitió mejorar el código de reducción de datos. El brillo máximo observado en el mapa de CHARM es de $\sim 170\text{ K}$, esto es aproximadamente un factor de dos menor que lo esperado en esta frecuencia [8]. La diferencia puede explicarse por algunos factores: (1) la falta de optimización de la posición de enfoque del espejo secundario antes de las observaciones y (2) el modelo de superficie activa del LMT proporciona una curva de ganancia casi plana en un rango de elevación de 30° a 80° , fuera de este rango la ganancia cae rápidamente hacia elevaciones más bajas, el mapa de la luna mostrado en la Figura 8 fue observado a $\sim 20^\circ$. [32]
- La segunda noche de observaciones tuvo condiciones meteorológicas significativamente mejores, con una opacidad promedio en el cenit de $225\text{GHz}=0.04$. En estas condiciones se observaron una serie de mapas en Júpiter y Venus, lo que permitió confirmar el correcto alineamiento del receptor con el eje óptico del telescopio. La temperatura equivalente máxima detectada para Júpiter y Venus fue de ~ 20 y 5.5 K respectivamente; una vez más, estos valores son menores que los reportados en la literatura para ambos planetas. Sin embargo, los tamaños de los discos planetarios están aproximadamente en acuerdo con los diámetros angulares esperados para ambos planetas ($\sim 33''$ para Júpiter y $\sim 17''$ para Venus). Desafortunadamente, el tiempo limitado en que estos planetas estuvieron disponibles en el cielo y la falta de sincronización entre el DCS y el backend de CHARM afectaron severamente la eficiencia de las observaciones, impidiendo la optimización del enfoque y las correcciones de astigmatismo necesarias para llevar a cabo medidas de la ganancia del LMT a 345 GHz . En futuras observaciones, el sistema de recopilación de datos estará completamente integrado y permitirá realizar mediciones espectrales de la línea CO (3-2) en regiones de formación estelar cercanas. [32]

La conclusión a la que llegaron después de dichas observaciones fue que:

"Se ha instalado con éxito un receptor heterodino a temperatura ambiente utilizando tecnología de mezclador subarmónico de diodo Schottky en la banda de 345 GHz en el Gran Telescopio Milimétrico en México y se realizaron con éxito observaciones 'primera luz' en longitudes de onda submilimétricas no optimizadas. La descripción del sistema y la adaptación óptica se mostraron en este documento, así como la sincronización y el procesamiento de la señal. El trabajo observacional futuro permitirá la optimización del sistema, la evaluación completa del rendimiento del LMT a 345 GHz y observaciones de líneas espectrales. Estas están planeadas para el período de invierno de 2020/21, pero dependen de la eliminación de restricciones por parte de la actual pandemia de COVID-19." [32]

El CHARM cumplió el objetivo del proyecto ASTEC, y no sólo logró realizar observaciones precisas en el GTM, sino que también logró conectar a instituciones de dos países diferentes para poder transmitir conocimiento técnico y tecnológico a los científicos

mexicanos, conocimiento sumamente valioso el cual se puede aplicar a otras áreas de investigación o industriales.

Como mencioné antes, el CHARM está en espera de una “tercera vida”, o de una nueva oportunidad para seguir su legado en la radioastronomía y el estudio de la atmósfera. Entre algunas de las ideas y propuestas que se pensaron en su momento, mencionaré algunas que fueron comentadas en las entrevistas, para poder darnos una idea del potencial que aún tiene el CHARM.

De acuerdo con el Dr. Ellison, otro de sus planes a futuro sería actualizarlo criogénicamente, y mejorarlo para tal vez, convertirlo en un instrumento permanente en el territorio mexicano. En el artículo publicado el 4 de agosto del 2019, en la página del RAL Space, se menciona al final que el Dr. Gary Fuller habla sobre que, en un futuro, CHARM le ayudará al GTM a realizar mediciones más precisas de los agujeros negros en los centros de las galaxias. También se menciona que la tecnología de CHARM tiene una amplia gama de aplicaciones industriales que podrían beneficiar a México, principalmente en los sensores activos para automóviles, sector en el cual México es líder. [33]

Conclusiones

1. Una vez que se construyó e instaló el GTM en México, la UMass logró aumentar la capacidad de investigación desde México con respecto al radiotelescopio que tenía en Massachusetts, y rebasó las expectativas a tal grado que el FCRAO en la reserva de Quabbin, fue desmantelado. El resultado de la colaboración entre México y Estados Unidos fue fructífera, exitosa y sobre todo trascendente para la ciencia en México.
2. En la actualidad la antena del GTM es considerada la más grande de su tipo, lo que hace el GTM el telescopio de ondas milimétricas de plato único más grande del mundo con sus 50 metros de diámetro y de tipo Cassegrain.
3. El convenio de colaboración ASTEC del GCRF tuvo éxito, ya que el SHIRM se pudo modificar a las necesidades del GTM, y al convertirlo en el CHARM, se capacitó a la comunidad de científicos mexicana a través del Dr. Edgar Colín. Fue gracias a este proyecto colaborativo que no solo se crearon relaciones estrechas entre dos de las instituciones científicas más grandes del Reino Unido y de México, sino que también se pudo cuantificar el potencial del GTM y su precisión milimétrica, lo cual lo deja como uno de los instrumentos radioastronómicos más importantes de la actualidad.
4. Tal como se estipula en el convenio de colaboración, el CHARM fue llevado a México con éxito, se instaló y probó en el GTM de igual manera, e incluso se experimentó con él cuando se encontraba en las instalaciones del INAOE. Todo lo anterior demuestra que los convenios sí rinden frutos y, sobre todo, resultados positivos. Sin embargo, es necesario reconocer que desde el punto de vista puramente científico, no se obtuvieron resultados ni se terminó artículo alguno.

A mi parecer la mayor de las enseñanzas que queda después de que este tipo de convenios sean acordados, es que la ciencia sigue siendo universal y beneficia a todas las partes involucradas. Sin colaboraciones no hay avance ni progreso, y sin ello no hay ciencia. Muchas veces pensamos que las colaboraciones bilaterales solamente tienen beneficios unilaterales, sin embargo, en esta tesis podemos ver dos colaboraciones muy grandes en las cuales México participó, y que, además, todas las partes involucradas se vieron beneficiadas en partes iguales.

El poder seguir colaborando con otras instituciones, culturas, países y personas nos permite a los científicos el poder ampliar nuestros límites de investigación, así como el poder acceder a herramientas tecnológicas que puedan ayudar a sustentar nuestras hipótesis experimentales, nuestros proyectos y nuestros objetivos profesionales; sin embargo, no es lo anterior lo que encuentro más valioso de las colaboraciones internacionales, sino que el poder compartir ideas, formas de trabajo, metodologías y perspectivas socioculturales, es lo que siempre me parece más fructífero, ya que tanto los científicos como los filósofos, siempre necesitarán de perspectivas nuevas que los hagan pensar más allá de sus límites, y con eso, plantear nuevos problemas y soluciones que nos ayuden a entender mejor al universo que nos rodea.

Bibliografía

Capítulo 1.

- [1] Five College Consortium, *History of the Five College Astronomy Department*, s/f. <https://www.fivecolleges.edu/academics/astronomy#history>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.
- [2] F. P. Schloerb, *Astronomy Research at the Five College Radio Astronomy Observatory*, National Science Foundation. s/f. https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=0100793. Consultado el 13 de noviembre de 2024.
- [3] W. H. Irvine, *Reflections on the Growth of Astronomy at the University of Massachusetts and the Five College Astronomy Department*. (2006).
- [4] Wikipedia, *Five College Radio Astronomy Observatory*, s/f. https://en.wikipedia.org/wiki/Five_College_Radio_Astronomy_Observatory. Consultado el 13 de noviembre de 2024.
- [5] Wikipedia, *Molecular cloud*, s/f. https://en.wikipedia.org/wiki/Molecular_cloud. Consultado el 13 de noviembre de 2024.
- [6] INAOE, *Plan Estratégico Gran Telescopio Milimétrico*. (2009). <https://www.inaoep.mx/~jgob/hjg/2009/Primera/s1.7.pdf>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.
- [7] E. Carrasco Licea, A. Carramiñana, J.L. Avilés, O. Yam & F. Luna. *Weather conditions at Sierra Negra Site*. INAOE (2003). <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/1569/1/CarrascoLicE.pdf>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.
- [8] C. G. De Pree, *Radio interference from satellites is threatening astronomy*, Astronomy Digital Magazine (2023). <https://www.astronomy.com/science/radio-interference-from-satellites-is-threatening-astronomy/>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.
- [9] National Radio Astronomy Observatory. *Radio Frequency Interference*. NRAO. s/f. <https://public.nrao.edu/telescopes/radio-frequency-interference/>. Consultado el 14 de noviembre de 2024.

[10] Green Bank Observatory, *National Radio Quiet Zone*. Green Bank Observatory. s/f. <https://greenbankobservatory.org/about/national-radio-quiet-zone/>. Consultado el 14 de noviembre de 2024.

Capítulo 2.

[11] L. F. Rodríguez, *La astronomía en México: El pasado reciente y los retos del futuro*, Instituto de Astronomía, UNAM. s/f. <https://colnal.mx/wp-content/uploads/2020/01/La-Astronomia-en-Mexico-El-Pasado-reciente-y-los-retos-del-futuro-Astronomy-in-Mexico-The-Recent-Past-and-the-Challenges-of-the-Future.pdf>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

[12] J. Bartolucci, Una mirada etnográfica a la gestación del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. (Instituto de Investigaciones sobre la Universidad y la Educación, UNAM, 2013).

[13] J. Bartolucci, La modernización de la ciencia en México. El caso de los astrónomos. (Universidad Nacional Autónoma de México, D.F. , 2002).

[14] Consejo Universitario, *Propuesta de modificación del estatuto general*, Instituto de Radioastronomía y Astrofísica (2015). <https://stunam.org.mx/41consejouni/consejo%20universitario15/2015/2%20PLENO%202015/1.%20SesiondelplenodelCUdel1dejulio/5.%20Primeralecturamodiestatuto%20gral/1.7propuesta.pdf>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

[15] Nobel Prize, *Edward Victor Appleton – Biographical*. Nobel Prize. s/f. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1947/appleton/biographical/>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

[16] M. Longair, *A brief history of astronomy, astrophysics, and cosmology (1945-2000)*. Royal Society (2022). <https://royalsociety.org/blog/2022/06/brief-history-of-astronomy-astrophysics-and-cosmology-1945-2000/>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

[17] University of Cambridge, *History of the Institute of Astronomy*, s/f. <https://www.astro.phy.cam.ac.uk/about/history>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

[18] UK Research and Innovation, *Rutherford Appleton Laboratory*. UKRI. s/f. <https://www.ukri.org/who-we-are/stfc/facilities/rutherford-appleton-laboratory/>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

[19] UK Research and Innovation, *RAL Space*. UKRI. s/f. <https://www.ukri.org/who-we-are/stfc/facilities/rutherford-appleton-laboratory/ral-space/#contents-list>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

Capítulo 3.

[20] Global Challenges Research Fund, *UK Research and Innovation*, UKRI (2023). <https://www.ukri.org/what-we-do/browse-our-areas-of-investment-and-support/global-challenges-research-fund/> Consultado el 13 de noviembre de 2024.

[21] Newton Fund, *UK Research and Innovation*. UKRI (2024). <https://www.ukri.org/what-we-do/browse-our-areas-of-investment-and-support/newton-fund/>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

[22] UK Research and Innovation, *ASTEC: Astronomical System Training, Engineering and Collaboration*. UKRI. s/f. <https://gtr.ukri.org/projects?ref=ST%2FR002843%2F1>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

[23] RAL Space, *Millimetre Wave*, STFC RAL Space. (2023). <https://www.ralspace.stfc.ac.uk/Pages/Millimetre-Wave.aspx>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

[24] B. Thomas, S. Rea, B. Moyna, y D. Matheson, *Development of a 340-GHz Sub-Harmonic Image Rejection Mixer Using Planar Schottky Diodes*, (2008).

[25] RAL Space, *Terahertz and Millimetre Wave Receivers and Radiometers*, STFC RAL Space (2023). <https://www.ralspace.stfc.ac.uk/Pages/Terahertz-and-Millimetre-Wave-Receivers-and-Radiometers.aspx>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

Capítulo 4.

[26] UK Research and Innovation, *ASTEC: Astronomical System Training, Engineering and Collaboration*. <https://gtr.ukri.org/projects?ref=ST%2FR002843%2F1>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

[27] British Council, *What are work placements?*. British Council. s/f. <https://study-uk.britishcouncil.org/why-study/succeed-your-career/work-placements>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

[28] E. Rodríguez Mega. *Violent drug cartels stifle Mexican science. Abandoned projects and delayed research have become common problems as security issues*

crop up across the country. (Revista Nature, 2019). <https://www.nature.com/articles/d41586-019-00458-6>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

[29] Agencia Nacional de Aduanas de México, *Exportación e Importación Temporal de Mercancías mediante “Cuadernos ATA”*. SEGOB. s/f. <https://anam.gob.mx/exportacion-e-importacion-temporal-de-mercancias-mediante-cuadernos-ata/>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

[30] INAOE, *ToI TEC, una nueva cámara ultra-rápida para el Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano*. INAOEP. s/f. <https://www.inaoep.mx/noticias/?noticia=437&anio=2016>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

[31] Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano, *Julio 28, 2021 – Estado actual del GTM y preparación para el retorno a operaciones científicas considerando el COVID-19*. LMTGTM (2021). <http://lmtgtm.org/july-28th-2021-current-status-and-preparation-to-return-to-large-millimeter-telescope-science-operations-under-covid-19/?lang=es>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

[32] E. Colín-Beltrán, G. Fuller, B. Ellison, S. Kurtz, D. Hughes, *et al.*, *CHARM: a room-temperature 345 GHz receiver for the Large Millimeter Telescope*, SPIE Proc. 11453 (2020). <https://doi.org/10.1117/12.2561877>

[33] RAL Space, *Collaborating with CHARM*. RAL SPACE STFC. s/f. <https://www.ralspace.stfc.ac.uk/Pages/Collaborating-with-CHARM.aspx>. Consultado el 13 de noviembre de 2024.

ANEXO 1. La importancia de los observatorios milimétricos en el campo de la Astronomía.

Un observatorio milimétrico es crucial en astronomía porque permite estudiar el universo en longitudes de onda del rango milimétrico y submilimétrico, entre el infrarrojo lejano y las microondas. Las microondas son una forma de energía electromagnética que se encuentra en el extremo más bajo del espectro electromagnético. Este tipo de energía se ubica en longitudes de onda de 1 a 10^3 m, entre la radiación de infrarrojo y las ondas de radio, a frecuencias de entre 0.3 y 300 GHz. Aquí están las razones clave de su importancia:

Estudio de las regiones de formación estelar y planetaria.

Las ondas milimétricas y submilimétricas permiten estudiar la dinámica del gas que alimenta la formación de estrellas. Con estas herramientas, podemos detectar la estructura de las nubes interestelares, el material que cae sobre las estrellas y que se acumula en ellas, y los poderosos chorros que las estrellas jóvenes impulsan cuando el material que cae sobre ellas interactúa con sus vientos y campos magnéticos. [1]

Detección de moléculas y análisis de la química interestelar.

En estas longitudes de onda se detectan trazas de moléculas en el espacio interestelar que emiten radiación milimétrica. Cada molécula emite frecuencias específicas (su "huella dactilar"), lo que permite a los astrónomos identificar y estudiar compuestos orgánicos e inorgánicos, incluyendo moléculas complejas necesarias para la vida. Esto abre puertas al estudio de la química en el espacio, ayudando a entender el origen de moléculas orgánicas en el universo. La astroquímica implica la detección de una amplia variedad de especies químicas y la evaluación de su abundancia. A pesar de que las señales de las moléculas pueden provenir de miles de años luz de distancia, se puede realizar un análisis cuantitativo de mezclas de gases interestelares mediante el uso de radiotelescopios y teledetección. A primera vista, los radiotelescopios pueden parecer una herramienta extraña para un químico, pero estos instrumentos básicamente explotan principios fundamentales de la espectroscopia molecular de manera similar a un espectrómetro de laboratorio. [2]

Las moléculas tienen niveles de energía rotacional, vibracional y electrónica. Los niveles de energía electrónica, que se muestran en la siguiente imagen (Fig.1) para una molécula diatómica (de dos átomos), dependen de la distancia internuclear y están representados por "pozos" de potencial. Dentro de cada pozo se encuentran los niveles de energía vibracional, que surgen del movimiento de resorte de los enlaces químicos, así como los niveles de energía rotacional, producidos por la rotación física de extremo a extremo de la molécula sobre su centro de masa. Un cambio en los niveles de energía electrónica requiere que un electrón cambie de orbital molecular y estos cambios corresponden a las mayores diferencias de energía y fotones de energía relativamente alta, en las regiones óptica y ultravioleta del espectro electromagnético. Los cambios en los niveles de energía vibracional corresponden a las energías de los fotones en la región infrarroja, mientras que las diferencias en los niveles de energía rotacional producen fotones en los regímenes de radio milimétricos y submilimétricos a frecuencias de ~30-300 GHz. Dichas frecuencias se pueden lograr gracias a los radiotelescopios. [2]

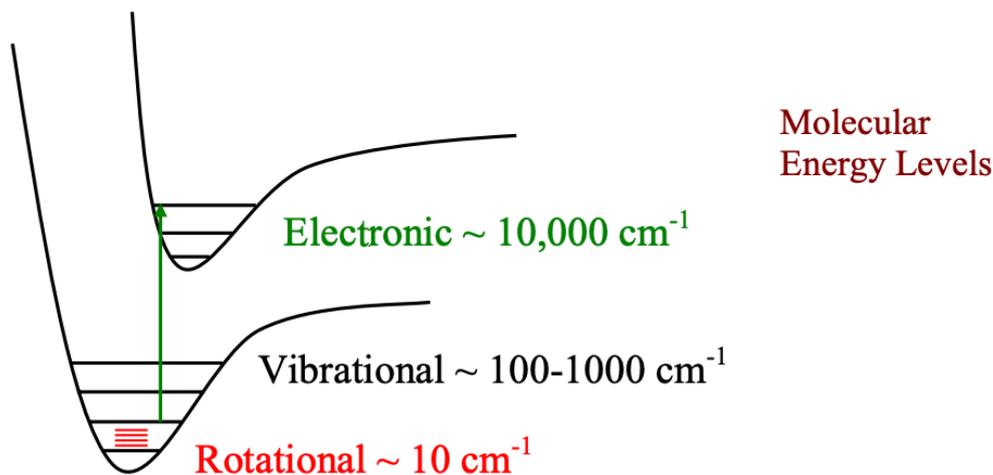


Fig. 1. Niveles de energía de una molécula diatómica. Los pozos de potencial son estados electrónicos individuales. Dentro de cada uno de estos "pozos" hay un nivel vibracional y rotacional. [2]

Observación de galaxias distantes y evolución del universo.

La expansión del universo "corre" hacia el rango milimétrico la luz emitida por galaxias distantes debido al corrimiento al rojo. Esto significa que muchas galaxias, que ya no son visibles en luz visible o infrarroja, pueden observarse con telescopios milimétricos. Así, se obtienen imágenes y datos de las primeras galaxias y de la estructura del universo temprano, lo cual es fundamental para entender la evolución cósmica.

Estudio del fondo cósmico de microondas (CMB).

Los observatorios milimétricos permiten estudiar la radiación de fondo cósmico de microondas, el "eco" del Big Bang. Este estudio ayuda a probar modelos del universo temprano y da pistas sobre fenómenos fundamentales como la inflación cósmica. La observación del CMB en el rango milimétrico es una de las mejores herramientas para investigar la composición del universo y la naturaleza de la materia oscura y la energía oscura. [3]

Interferometría y alta resolución espacial.

Los observatorios milimétricos suelen funcionar en arreglo con varios radiotelescopios en red (como el ALMA, el Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), formando una especie de "super telescopio" mediante interferometría. Esto permite obtener imágenes de altísima resolución y estudiar con detalle objetos pequeños y lejanos, como los alrededores de agujeros negros, discos protoplanetarios y las estructuras de las galaxias.

En resumen, un observatorio milimétrico amplía las capacidades de la astronomía al permitir observar zonas y fenómenos invisibles en otras longitudes de onda, proporcionando datos fundamentales para entender la evolución y la química del cosmos, el nacimiento de estrellas y planetas, y los orígenes del universo.

ANEXO 2. Funcionamiento del CHARM, y su diagrama.

CHARM es un receptor a temperatura ambiente centrado en 345 GHz que utiliza tecnología de mezclador de diodos de barrera Schottky para realizar una conversión

descendente de frecuencia. En la Fig.2. se encuentra el diagrama del CHARM. En el proyecto ASTEC se actualizó el mezclador y se cambió el receptor del modo de banda lateral única al modo de banda lateral doble. En segundo lugar, el ancho de banda de Frecuencia Intermedia (FI) instantánea se incrementó con mezcladores LO (Oscilador Local, por sus siglas en inglés) mejorados, triplicándolo del ancho de banda de FI original de 8 a 12 GHz a 4 a 16 GHz. También se instalaron dos espectrómetros adicionales para permitir observaciones de banda más amplia con resoluciones espectrales de hasta 0.73 MHz. Además, se introdujo una interfaz óptica para permitir la interfaz con el telescopio GTM y el control del sistema, y se actualizó el software de operación. Es importante señalar que, si bien CHARM es un instrumento autónomo (extremo frontal y posterior montados en la misma estructura), fue necesaria una adaptación óptica al telescopio antes de poder instalar el receptor en el GTM. [4]

El receptor es un instrumento de banda lateral doble heterodino de un píxel. El mezclador es un dispositivo Schottky subarmónico a temperatura ambiente compuesto por varios subsistemas: un módulo receptor de RF (extremo frontal con fuente de oscilador local sintonizable {LO}), un módulo de conversión descendente en fase y en cuadratura (I/Q), un módulo de espectrómetro de banda ancha (WBS), un módulo de calibración y un módulo de potencia, térmico y de control (PT&C). [4]

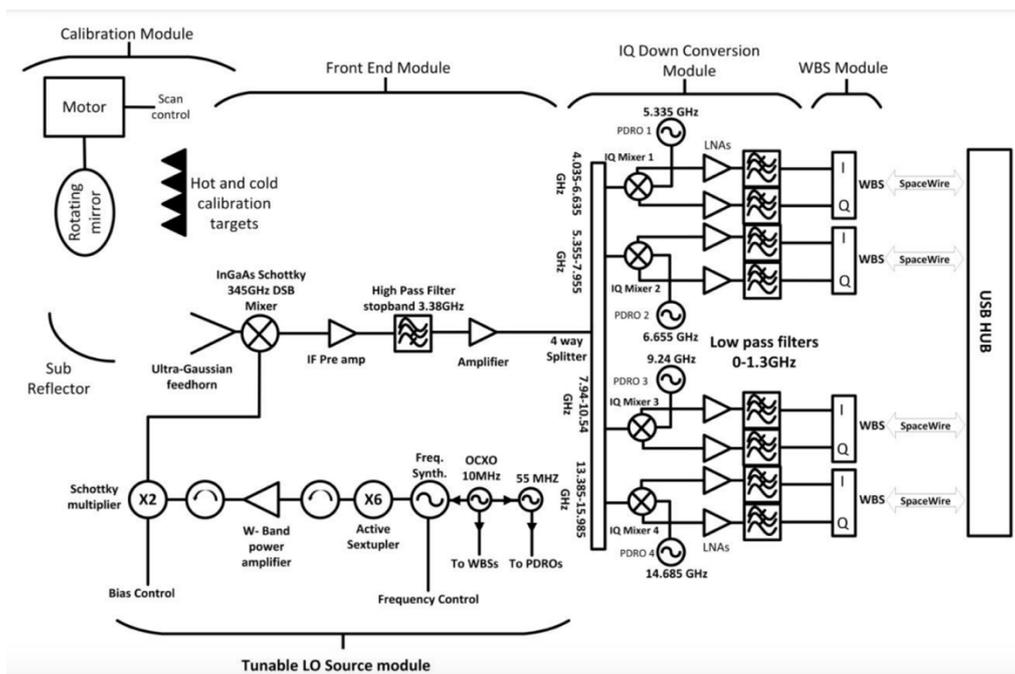


Fig. 2. Diagrama de CHARM. [4]

ANEXO 3. La óptica de los radio telescopios Cassegrain.

La óptica de los radio telescopios Cassegrain es un diseño óptico ampliamente utilizado en radiotelescopios y otros telescopios reflejantes. La configuración Cassegrain se basa en un sistema de espejos que concentra las ondas de radio en un solo punto de enfoque, optimizando la captura y análisis de las señales que vienen de objetos celestes. La óptica Cassegrain es especialmente útil en radiotelescopios porque proporciona una alta capacidad de captación de señales débiles provenientes de objetos astronómicos, como galaxias distantes, nubes de gas y polvo, y otros cuerpos celestes. La mayoría de los radiotelescopios grandes, como el Very Large

Array (VLA) en Nuevo México o el ALMA en Chile, utilizan variaciones de la configuración Cassegrain, aprovechando su alta eficiencia y precisión para estudiar el cosmos en longitudes de onda de radio. [5]

Este diseño es fundamental para mejorar la precisión en la observación de fenómenos lejanos, siendo una herramienta clave en la astronomía moderna.

Espejo primario parabólico.

- El elemento principal de la óptica Cassegrain es un espejo primario de forma parabólica. En un radiotelescopio, este espejo es generalmente muy grande, ya que su tamaño determina la cantidad de radiación que puede captar.

- La forma parabólica del espejo hace que las ondas de radio (o luz, en otros tipos de telescopios) que llegan desde una fuente lejana y paralela al eje óptico del telescopio se reflejen hacia un punto llamado foco primario. [5]

Espejo secundario hiperbólico.

- Para redirigir y enfocar la radiación en un punto más accesible, el radio telescopio Cassegrain usa un espejo secundario con una forma hiperbólica. Este espejo secundario está situado entre el espejo primario y el foco primario.

- El espejo secundario refleja las ondas de radio hacia atrás, redirigiéndolas a través de un orificio en el centro del espejo primario. Este cambio de dirección hace que la longitud del tubo óptico sea más corta, logrando un diseño compacto en relación a su distancia focal efectiva. [5]

Foco final (o foco Cassegrain).

- Después de reflejarse en el espejo secundario, las ondas de radio convergen en el foco Cassegrain, que se encuentra detrás del espejo primario. En este punto se colocan los instrumentos y detectores que analizan las señales recibidas.

- Esta ubicación del foco es mucho más accesible que el foco primario (ubicado frente al espejo secundario) y permite instalar receptores y analizadores de ondas de radio de una manera eficiente y práctica. [5]

Ventajas del diseño Cassegrain en radio telescopios.

- Compacidad y reducción de tamaño: Al usar un sistema de espejos que dirige las ondas a través del espejo primario, la distancia focal efectiva es mayor sin necesidad de un telescopio de mayor longitud física.

- Calidad de imagen y corrección de aberraciones: El diseño Cassegrain minimiza aberraciones esféricas y de coma, proporcionando una mejor calidad de señal y reduciendo las distorsiones en la imagen final.

- Acceso al foco y a los instrumentos: La ubicación del foco detrás del espejo primario permite una colocación más práctica de los detectores, simplificando la captación y el análisis de las señales de radio. [5]

ANEXO 4. ¿Qué es un diodo Schottky?

Un diodo Schottky es un tipo de diodo semiconductor que se distingue por su rápida respuesta y bajo voltaje de encendido. Este comportamiento especial es útil en

aplicaciones de alta frecuencia y de baja caída de voltaje, como en rectificadores de alta velocidad y circuitos de radiofrecuencia. La física de un diodo Schottky se basa en la unión metal-semiconductor, en lugar de la unión entre materiales semiconductores tipo p y tipo n, como en los diodos convencionales. Aquí está cómo funciona.

Estructura de un Diodo Schottky.

- La estructura de un diodo Schottky consiste en un metal en contacto directo con un semiconductor tipo n.
- Al contrario de los diodos de unión p-n convencionales, aquí no existe una región tipo p. En su lugar, el metal y el semiconductor tipo n forman una barrera Schottky (una barrera de potencial) en la interfaz.
- Algunos metales comúnmente usados para los diodos Schottky incluyen oro, aluminio y platino, que forman una unión con una región de silicio tipo n. [6]

Formación de la Barrera Schottky.

- Cuando el metal y el semiconductor entran en contacto, los electrones fluyen del semiconductor al metal hasta que se alcanza un equilibrio.
- Esto genera una zona de depleción en el lado del semiconductor, ya que una parte de los electrones del semiconductor tipo n ha migrado hacia el metal.
- La diferencia de energía entre los electrones del metal y los del semiconductor crea una barrera de potencial en la interfaz. La altura de esta barrera, llamada barrera Schottky, depende de las propiedades del metal y el semiconductor. [6]

Funcionamiento del Diodo Schottky: Polarización Directa y Reversa.

- Polarización directa: Cuando se aplica un voltaje positivo al diodo (con el metal conectado al terminal positivo y el semiconductor al negativo), los electrones en el semiconductor ganan suficiente energía para cruzar la barrera y moverse hacia el metal, permitiendo el flujo de corriente.
- Polarización inversa: Cuando el diodo está polarizado inversamente, se crea una gran diferencia de potencial en el lado del semiconductor, lo cual aumenta el ancho de la zona de depleción y evita el paso de electrones. Esto significa que el diodo bloquea la corriente en polarización inversa, aunque permite el paso de pequeñas corrientes de fuga. [6]

Características de la Respuesta del Diodo Schottky.

- Bajo Voltaje de Conducción: Los diodos Schottky tienen un voltaje de encendido bajo, generalmente entre 0.2 y 0.3 V, en comparación con los diodos de unión p-n que requieren alrededor de 0.7 V.[6]
- Tiempo de Respuesta Rápida: La unión metal-semiconductor permite una respuesta rápida a cambios de voltaje, haciendo al diodo Schottky ideal para aplicaciones de alta frecuencia. Esto es porque el diodo Schottky no tiene una carga de portadores minoritarios como en el caso de la región p del diodo convencional, lo que reduce el tiempo de recuperación.[6]
- Baja Capacitancia en la Unión: La capacitancia en la barrera Schottky es menor que en una unión p-n, lo que también mejora el desempeño a altas frecuencias. [6]

En resumen, la física de un diodo Schottky se basa en la barrera de potencial creada en la interfaz metal-semiconductor, lo cual le permite operar eficientemente con un

bajo voltaje de encendido, rápida velocidad de respuesta y baja capacitancia, siendo especialmente útil en aplicaciones de alta frecuencia y baja potencia.

ANEXO 5. Tamaño de un píxel en una cámara radio astronómica.

El tamaño de un píxel en una cámara radio astronómica, también llamado "resolución espacial," depende de varios factores técnicos y físicos, como la longitud de onda de observación, el diámetro de la antena del radiotelescopio y el método de observación (si se usa un solo plato o un arreglo de interferometría).

Relación entre el tamaño del píxel y la longitud de onda.

Los radiotelescopios tienen que ser mucho más grandes que los telescopios ópticos porque las longitudes de onda de las ondas de radio son mucho mayores que las longitudes de onda de la luz visible. Las longitudes de onda de las ondas de radio están entre $\lambda \approx 3 \text{ km}$ y $\lambda \approx 1 \text{ cm}$, mientras que las longitudes de onda de la luz visible están entre $\lambda \approx 4 \times 10^{-7} \text{ m}$ (violeta) y $\lambda \approx 7 \times 10^{-7} \text{ m}$ (rojo). La resolución angular es una medida de cuán pequeños detalles de un área en el cielo pueden verse. Cuanto más grande sea el telescopio, más detalles se pueden observar en una longitud de onda dada. [7]

La resolución angular (θ) de un telescopio se puede calcular utilizando la longitud de onda de la luz o las ondas de radio (λ) que se está utilizando para observar el telescopio y el diámetro (D) del telescopio.

$$\theta = 2.5 \times 10^5 \times \lambda/D$$

Donde θ es en arcosegundos, λ y D en metros.

Es por lo anterior que, la resolución que logra un radiotelescopio típico en longitudes de onda de radio típicas no es muy detallada. Para superar esta dificultad, los radioastrónomos utilizan varios radiotelescopios al mismo tiempo, una técnica llamada interferometría. Esto proporciona resoluciones angulares de 0.001" o mejores al crear efectivamente un solo telescopio tan grande como la distancia entre los dos telescopios más alejados. La potencia de captación de luz no aumenta con esta técnica, pero la resolución angular mejora enormemente. El Very Large Array (VLA) en Nuevo México consta de 27 radiotelescopios de 25 metros de diámetro cada uno, dispuestos en una configuración en forma de Y. Los 27 telescopios se utilizan simultáneamente para observar un objetivo, luego se suman sus observaciones. [7]

En la práctica, el tamaño de un píxel en una imagen radio astronómica es configurado durante el procesamiento de datos, y los astrónomos pueden ajustar la escala de los píxeles para equilibrar la resolución y el tamaño de la imagen. Sin embargo, generalmente, el tamaño de los píxeles es configurado para coincidir con la resolución angular del sistema. En arreglos de interferometría, el software de procesamiento de datos también ajusta el tamaño de los píxeles para representar fielmente la información resuelta por el arreglo. [7]

El tamaño de un píxel en una cámara radio astronómica depende de la longitud de onda y del diámetro del telescopio o la línea de base de un arreglo. Un tamaño de píxel más pequeño equivale a mayor resolución, y se logra con frecuencias más altas

y telescopios más grandes o con arreglos interferométricos de gran distancia entre antenas. Este tamaño define la cantidad de detalle que se puede captar y es un parámetro fundamental para el análisis de imágenes en radioastronomía. [7]

Bibliografía de los anexos.

[1] Magdalen College, Cambridge. *Stellar nurseries: studying the birth of stars and planets*. Recuperado de: <https://www.magd.cam.ac.uk/news/stellar-nurseries-studying-birth-stars-and-planets>

[2] Ziurys, L. M., & Apponi, A. J. *Interstellar Molecules as Probes of Star Formation and Prebiotic Chemistry: A Laboratory in Radio Astronomy*. Recuperado de: https://aro.as.arizona.edu/~aro/outreach/UofWashington/ARO12m_03-09-05.pdf

[3] ESA. *Cosmic Microwave Background (CMB) radiation*. Recuperado de: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Cosmic_Microwave_Background_CMB_radiation

[4] Colín-Beltrán, E., Fuller, G., Ellison, B., Kurtz, S., Hughes, D., *et al.* "CHARM: a room-temperature 345GHz receiver for the Large Millimeter Telescope". *Revista Mexicana de Física*, 2020.

[5] Thompson, A. R., Moran, J. M., & Swenson, G. W. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy* (3ª ed.). Springer, 2017.

[6] Sze, S. M., & Ng, K. K. *Physics of Semiconductor Devices* (3ª ed.). Wiley, 2006.

[7] Las Cumbres Observatory. *Radio Telescopes*. Recuperado de: <https://lco.global/spacebook/telescopes/radio-telescopes/#:~:text=As%20well%20as%20having%20much,pixel%20view%20of%20the%20sky>