

Capítulo 5

Ciencias planetarias y astrobiología

5.1. Introducción

El GTM estudiará los planetas, satélites y otros cuerpos menores del Sistema Solar, además de los discos protoplanetarios de sistemas externos. Algunos aspectos de estos estudios son críticos para caracterizar las condiciones que llevaron a la generación de la vida en la Tierra, y para buscar condiciones similares en otros sistemas planetarios.

El campo emergente de la astrobiología incluye, entre otras, las áreas descritas en este capítulo, además de la astroquímica, que ya se ha tratado en capítulos anteriores.

5.2. Cuerpos pequeños

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

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



Figura 5.1: Cometa Hale-Boop al fondo del Observatorio Radioastronómico de los Cinco Colegios.

investigación en la actualidad.

5.2.1. Cometas

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

La composición química e isotópica de los volátiles cometarios muestra similitudes sorprendentes con la de sus homónimos interestelares, lo que se

puede interpretar como que los cometas preservan las condiciones de las nubes de las que se formaron, o que la nebulosa solar exterior imita las condiciones de las nubes interestelares. En el primer caso, se pueden extraer importantes consecuencias sobre la transición entre la etapa interestelar y solar del material, mientras que en el segundo caso, se pueden establecer límites sobre la temperatura, densidad, campo de radiación y mezcla turbulenta en las zonas externas del disco.

En los últimos años se ha puesto en evidencia que las observaciones milimétricas y submilimétricas son una herramienta indispensable para la exploración de la química y física cometaria^[2]. Estas observaciones permiten caracterizar la composición química, la densidad, temperatura y las velocidades de eyección de la atmósfera cometaria, llamada coma. De hecho, casi todas las especies moleculares polares identificadas en cometas se han descubierto a través de ondas milimétricas y submilimétricas. La obtención de imágenes de esta emisión es particularmente importante, ya que los parámetros físicos deben de variar a lo largo de la coma. Además, las imágenes pueden distinguir entre posibles orígenes de una especie molecular, por ejemplo, sublimación de hielos nucleares o producción química o fotoquímica de la coma. Esta información es fundamental para determinar la composición del núcleo, que, de otra forma, sólo se puede determinar con experimentos in situ.

La poca sensibilidad y ausencia de arreglos de receptores en la mayor parte de los radiotelescopios del mundo ha limitado, hasta la fecha, los estudios de la distribución de la emisión molecular y del polvo en la coma cometaria,

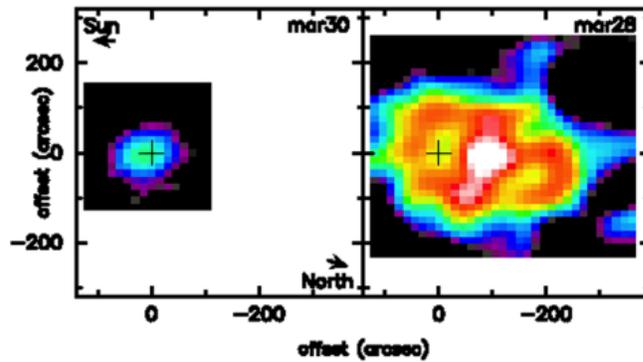


Figura 5.2: Distribución de la emisión de las transiciones $J = 1-0$ de las moléculas HCN (izquierda) y HCO^+ (derecha) en el Cometa Hale-Boop, observadas en el FCRAO^[3]. La cruz marca la posición del núcleo.

y el trabajo realizado en este campo, proviene fundamentalmente del 14 m del FCRAO^[3]. Se cree que los cometas se han formado a un gran intervalo de distancias heliocéntricas. No obstante, se desconocen completamente las variaciones químicas y las diferencias de la emisión en función de su distancia al Sol. La alta sensibilidad y resolución angular del GTM permitirán una cartografía fidedigna de la distribución de los constituyentes moleculares y del polvo de las comas cometarias, que son parámetros críticos para conocer la naturaleza de los cometas^[4].

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

internacionales, que en general tienen una programación muy rígida.

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

La detección directa del núcleo cometario es ya un hito en sí mismo^[5]. La detección directa en el visible e infrarrojo es esencialmente imposible, debido a la confusión creada por la emisión del polvo, pero éste es un problema menor en ondas milimétricas. La temperatura de brillo superficial, se podrá estimar observando el espectro en varias frecuencias: sólo así se podrá deducir el tamaño del núcleo a través del flujo observado. Debido a que los cometas son irregulares, el tamaño expuesto en las observaciones cambiará según el cometa rota, propiciando el cambio del flujo. Por lo tanto, en el seguimiento del cometa, se podrá medir además del periodo de rotación, la forma del núcleo. Asimismo, tales medidas permitirán conocer la naturaleza de los centros de emisión de los chorros de gas que producen la coma.

5.2.2. Asteroides, centauros y objetos del Cinturón de Kuiper

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

La determinación del tamaño de los objetos del Cinturón de Kuiper es de tanto interés como la de su composición. Se necesitan observaciones en el régimen visible para caracterizar la cantidad de radiación reflejada por los objetos, y de observaciones milimétricas, para medir la emisión térmica intrínseca. La radiación absorbida por un cuerpo oscuro lo vuelve caliente y, cuanto mayor es ésta, mayor es su emisión térmica, produciendo un máximo

Tabla 5.1: Objetos pequeños observables con el GTM y AzTEC en exposiciones de 30 minutos^[6].

Clase	Número observable
Cercanos a la Tierra	100
Cinturón Principal	1500–2000
Trojanos	100–400
Centauros	30
Cinturón de Kuiper	10–15

de radiación entre el infrarrojo lejano y las ondas milimétricas. El GTM podrá medir los tamaños y la reflectividad de estos objetos trabajando en coordinación con telescopios ópticos. El arreglo SPEED permitirá detectar objetos del Cinturón de Kuiper de menos de 200 km de diámetro, unas cinco veces menores que los observados hasta ahora en ondas milimétricas.

La detección de Sedna^[7] en el 2004, a una distancia de 90 unidades astronómicas (UA), es uno de los descubrimientos del Sistema Solar exterior más renombrados en los últimos años. Sedna tiene una órbita extremadamente excéntrica que lo lleva desde 79 a 900 UA en un ciclo de unos 10 mil años, siendo, por lo tanto, el primero de los objetos conocidos más allá de la zona de los objetos clásicos del Cinturón de Kuiper. Puesto que Sedna está lo suficientemente alejado de los planetas gigantes como para que su

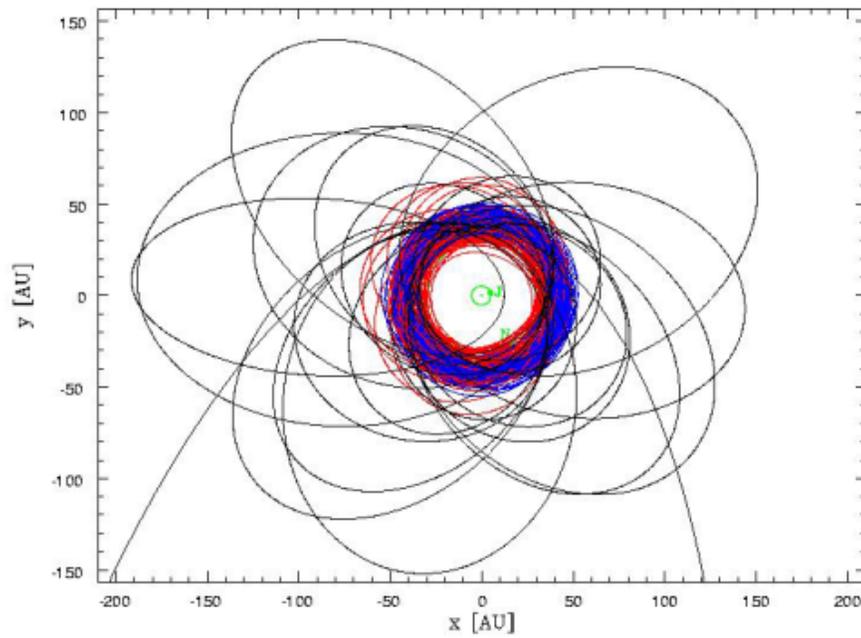


Figura 5.3: Posición de las órbitas de los objetos del Cinturón de Kuiper proyectadas en el plano de la eclíptica, junto con las órbitas de los planetas gaseosos gigantes (en verde, J por Júpiter, y N por Neptuno), como referencia de escala. Las órbitas trazadas en rojo pertenecen a objetos en resonancia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

órbita haya sido perturbada, es muy improbable que alguna vez perteneciera al Cinturón de Kuiper. Los descubridores de Sedna propusieron que el planeta se originó en la región interna de la Nube de Oort, que es la fuente de cometas de largo periodo. Se cree que Sedna tiene un diámetro ligeramente más pequeño que el de Plutón, pero su emisión térmica está por debajo de la sensibilidad del Telescopio Espacial Spitzer y de la antena milimétrica de 30 m del IRAM. El GTM será capaz de detectar Sedna y de caracterizar con precisión su tamaño, y el de otros objetos del mismo tipo cuyo diámetro sea mayor que 500 km. Sedna ha abierto la puerta a la búsqueda de una nueva población de objetos más allá del Cinturón de Kuiper.

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

5.3. Atmósferas planetarias y satelitales

De entre las especies moleculares observadas en las atmósferas de los planetas y satélites planetarios podemos encontrar: CO, ^{13}CO y HDO en Venus; CO, ^{13}CO , H_2O y H_2O_2 en Marte; CO y HCN en Neptuno; H_2O , CO, HCN, y CS en Júpiter, las últimas tres siguiendo el impacto del Cometa Shoemaker-Levy 9; H_2O en Saturno; CO, HCN, HC_3N , CH_3CH y HC^{15}N en Titán; y NaCl, SO, y SO_2 en Io.

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

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

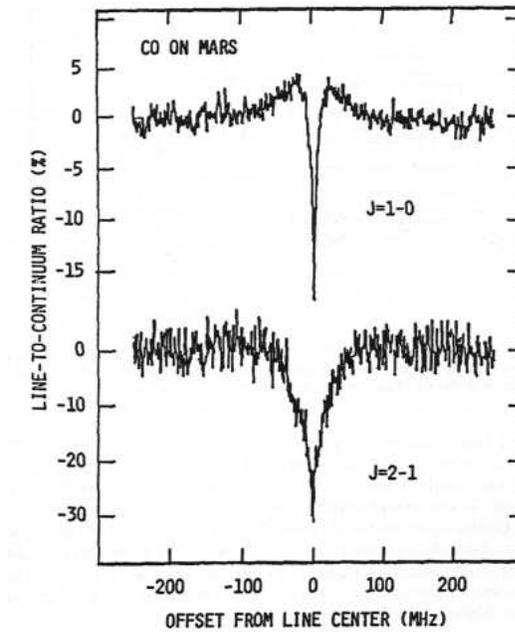


Figura 5.4: Absorción del monóxido de carbono en la atmósfera de Marte (transiciones rotacionales $J = 1 - 0$ y $2 - 1$), observada por el 14 m del FCRAO^[2].

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

El ensanchamiento por presión de moléculas típicas, como el CO, se incrementa en unos 3 MHz por cada milibar, provocando que las líneas planetarias puedan llegar a ser muy anchas. El receptor de corrimientos al rojo del GTM

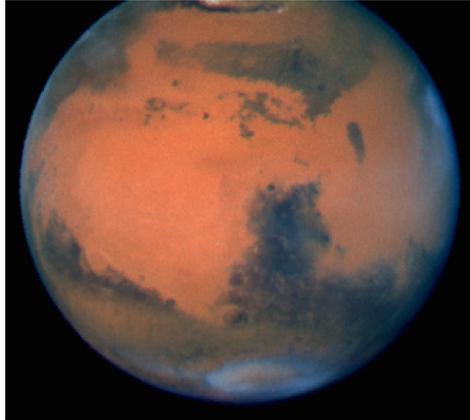


Figura 5.5: Imagen de Marte obtenida por el Telescopio Espacial Hubble. [Créditos: D. Crisp y el equipo científico de WFPC2, JPL/Caltech/NASA].

es un instrumento ideal para medir las anchuras de las líneas y para determinar los perfiles de temperatura y composición química en un intervalo de profundidades mucho más amplio que el que se conoce hasta la fecha. Algunos planetas, como Venus cerca de su conjunción inferior, Júpiter cerca de su oposición, o Saturno y sus anillos, son demasiado grandes para ser cartografiados eficientemente por ALMA, pero son perfectos para los planes cartográficos del GTM.

El GTM hará uso de una cola de observaciones para responder rápidamente a eventos inesperados, como el vulcanismo de Venus o Io, y para programar largos seguimientos de estos fascinantes objetos planetarios. De igual modo, los planetas y satélites con variaciones seculares, estacionales o rotatorias se podrán programar fácilmente.

5.4. Planetas extrasolares y discos protoplanetarios

Puesto que ya se han detectado planetas alrededor de otras estrellas de tipo solar, el estudio de casos análogos a la nebulosa solar se vuelve una posibilidad real. Existen numerosos casos de estrellas con estructuras que, con radios de cientos de UA, probablemente sean discos protoplanetarios. La investigación de la física y química de estos discos es un reto, debido a su pequeño tamaño. No obstante, observaciones con otros telescopios milimétricos, como el 30 m del IRAM, han llegado a reconocer moléculas tales como HCN, HNC, H₂CO, CN, C₂H, CS, HCO⁺ y CO en discos alrededor de estrellas de Tauro^[9]. De la excitación de las líneas se puede estimar la densidad de H₂, y así determinar la masa y la extensión de las regiones de congelación de las moléculas en granos. El GTM podrá realizar estudios preliminares y derivar la diversidad de propiedades de los discos encontrados en las regiones cercanas de formación estelar. Posteriormente, ALMA podrá llevar a cabo una medida directa de los gradientes dada su mayor resolución y área colectora. Estos resultados son claramente importantes para la astrobiología, ya que se espera que vida extraterrestre similar a la de la Tierra se encontrará en planetas similares al nuestro.

AzTEC con el GTM realizará un censo exhaustivo de la emisión de polvo de los discos alrededor de estrellas jóvenes. Al comparar las masas de polvo con las edades estelares, se constreñirán las escalas de tiempo en las cuales el polvo se acrecenta para formar planetas.

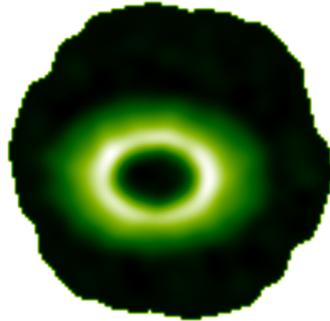


Figura 5.6: Imagen simulada de las observaciones de AzTEC a 1.1 mm de un disco protoplanetario^[10]. El disco tiene un radio interior de 40 UA, y uno exterior de 100 UA, con una inclinación de 45° , y se observa a una distancia de 3 pc. Este tipo de disco se puede crear mediante procesos que barren el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

5.5. Astrobiología

Dentro de los objetivos de la astrobiología se encuentra la determinación de la evolución de los compuestos orgánicos mediante los procesos cósmicos que llevaron al origen de la vida en la Tierra y, potencialmente, a otros planetas como la Tierra. Las estrellas y los planetas se forman a través del colapso de nódulos de material interestelar denso, con una etapa intermedia que pasa por discos de gas y polvo alrededor de las estrellas jóvenes. Algunas de las etapas de la evolución se pueden observar directamente, pero otras permanecen veladas por el polvo, que así y todo, puede penetrarse con ondas milimétricas. Para comprender el origen de la vida, primero necesitamos entender la formación de nuestro propio sistema planetario, incluyendo los procesos que llevaron a los inicios de la Tierra. Si queremos evaluar la pro-

babilidad de encontrar vida en otros planetas, primero necesitamos entender las similitudes y diferencias entre la evolución de nuestro sistema y las de sistemas exteriores.

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

La relevancia de las investigaciones sobre el Sistema Solar para la astrobiología se ha enfatizado a lo largo de este capítulo: los cometas ligan la compleja química orgánica del medio interestelar a la química de los cuerpos que se formaron en la nebulosa solar primigenia; los cometas y condritas carbonáceas trajeron agua a la Tierra primitiva; la naturaleza de las atmósferas planetarias y satelitales son claramente fundamentales para discernir si la

vida ha podido o podrá originarse en estos cuerpos celestes; y la distribución de las propiedades de los discos protoplanetarios de otras estrellas nos dan datos fundamentales sobre la posibilidad de la existencia de vida en otras partes de la Galaxia.

5.6. Astronomía de radar

Los estudios de radar, en los que una señal de radio se emite hacia un objetivo y se estudia su reflejo, o eco, es quizás uno de los pocos experimentos, propiamente dichos, que se pueden realizar en astronomía, en el sentido de que el astrónomo pueden escoger las propiedades de la señal a transmitir. Debido a que la intensidad de la señal transmitida y reflejada disminuyen con el cuadrado de la distancia, la intensidad del eco observado depende de la cuarta potencia de la distancia, limitando la aplicación de esta técnica a los objetos del Sistema Solar. Los planetas terrestres, los satélites planetarios, los asteroides y los cometas se han convertido en objetivos frecuentes de la astronomía de radar. En contraste, los planetas jovianos o el Sol, reflejan las señales de radar muy débilmente y, por lo tanto, no son objetivos viables para esta técnica.

El eco del radar contiene información sobre la rugosidad de la superficie en escalas similares a las de la longitud de onda del radar, y también sobre sus propiedades eléctricas. Por ejemplo, el carácter del eco recogido de las regiones polares de Mercurio y la Luna sugiere que podría haber hielo en algunos de sus cráteres, posiblemente porque éstos se mantienen en sombra permanente^[11]. Ya que el eco se puede analizar con exquisita precisión como

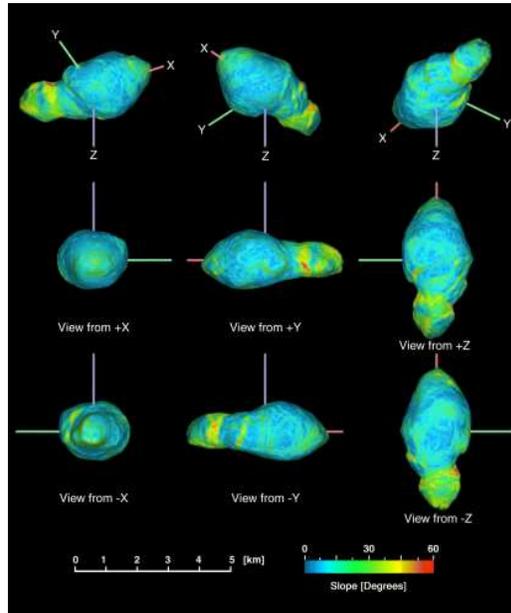


Figura 5.7: Modelo de alta resolución del asteroide en rotación 4179 Toutatis, construido a partir de observaciones de radar tomadas en Goldstone y Arecibo. [Créditos: R.S. Hudson, ©AAS^[12]].

función de la frecuencia y del tiempo de recepción, las propiedades superficiales se pueden cartografiar con una resolución que excede la del telescopio radar. Además, puesto que las ondas radar toman muestras de la superficie a diferentes profundidades según la longitud de onda empleada, se puede caracterizar la superficie a diferentes profundidades.

Dentro de la astronomía planetaria, el espectro milimétrico no está bien caracterizado debido a la falta de transmisores de alta potencia. Sin embargo, los transmisores ya se han desarrollado y la operación de estos equipos con el GTM podrá abrir una nueva era para la astronomía de radar: se podrán

explorar las zonas superiores de las superficies de los planetas terrestres, los satélites y otros cuerpos menores del Sistema Solar. Asimismo, se podrán obtener medidas de las distancias y velocidades de los objetos cercanos a la Tierra mucho más precisas que las disponibles por métodos en el régimen visible, una consideración muy importante cuando se trata de la protección de la Tierra del impacto potencial de estos objetos.

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

Referencias

- [1] Ehrenfreund, P. et al. (2002), “Astrophysical and Astrochemical Insights into the Origin of Life”, *Reports Progress Physics*, 65, 1427.
- [2] Schloerb, F.P. (1999), “Millimeter-wave Spectroscopy in the Solar System”, en “Millimeter-Wave Astronomy: Molecular Chemistry and Physics in Space”, W.F. Wall et al., eds., Kluwer Academic Publs., Dordrecht, 15-38.
- [3] Lovell, A.J. et al. (1998), “HCO+ Imaging of Comet C/1995 O1 Hale-Bopp”, *Astrophys. J. Lett*, 497, L117.
- [4] Irvine, W.M., Carramiñana, A. et al. (2003), “The Large Millimeter Telescope / El Gran Telescopio Milimétrico: A New Instrument for Astrobiology”, *Origins Life Evol. Biosphere*, 33, 597.
- [5] Crovisier, J. y Schloerb, F.P. (1991), “The Study of Comets at Radio Wavelengths”, en “Comets in the Post-Halley Era”, Vol. I, R. Newburn et al., eds., Kluwer Academic Publs., Dordrecht, 149-174.
- [6] Barrera-Pineda, P. S. et al. (2004), “Asteroid and Minor Bodies Science with the Large Millimetric Telescope”, en “II International Workshop on

Science with the GTC: Science with GTC 1st-light Instruments and the LMT”, eds. J.J. González y J.M. Rodríguez Espinosa, *Rev. Mex. Astron. Astro. Ser. Conf.*, en prensa.

- [7] Brown, M. E. et al. (2004), “A Sedna update: source, size, spectrum, surface, spin, satellite”, AAS- DPS meeting #36, artículo 03.01.
- [8] Kenyon, S.J. y Bromley, B.C. (2004), “Stellar Encounters as the Origin of Distant Solar System Objects in Highly Eccentric Orbits”, *Nature*, 432, 598.
- [9] Dutrey, A. et al. (2005), “The Observation of Circumstellar Disks: Dust and Gas Components”, en “Comets II”, M. Festou et al., eds., Univ. of Arizona, Tucson.
- [10] Ramos Stierle, F. (2004), “Exo-planets: Feasibility of Detection at Millimetre Wavelengths”, Tesis de Maestría, INAOE, México.
- [11] Butler, B. (2004), “Ice on Mercury and the Moon”, en “Icy worlds of the Solar System”, P. Dasch, ed., Cambridge University Press, 33 - 59.
- [12] Hudson, R.S. et al. (2003), “High-resolution model of Asteroid 4178 Toutatis”, *Icarus*, 161, 346.