

# Ondas de radio procedentes del Sol



La radioastronomía constituye una poderosa herramienta para entender muchos procesos cósmicos, y es igualmente fundamental para estudiar los procesos físicos que tienen lugar en la atmósfera del Sol.

**Eduardo Mendoza Torres,  
Alejandro Lara Sánchez y David Hiriart García  
(con la colaboración del equipo del RT5).**

## INTRODUCCIÓN

**E**l Sol no tiene una superficie sólida como la Tierra, sino que está compuesto por plasma. Un plasma es un gas en el que las cargas eléctricas juegan un papel importante. Se dice que es un *gas ionizado*, porque tiene electrones libres (partículas con carga eléctrica negativa) e iones (partículas con cargas positivas). Por tener muchas cargas libres, un plasma tiene características muy interesantes. Por ejemplo, un plasma puede ser, al igual que un metal, un buen conductor de la electricidad.

La interacción entre un plasma y un campo magnético es muy compleja. Dicha interacción se ha observado en diversos objetos celestes entre los que están los pulsares, los hoyos

negros y las estrellas en proceso de formación. Sin embargo, en la relación plasma-campo magnético hay aspectos que no se han entendido bien. Uno de ellos es el proceso llamado *reconexión magnética*, mediante el cual ocurre el cambio de la configuración de las líneas de fuerza del campo magnético liberando energía magnética que se transforma en otras formas de energía tales como energía cinética del plasma, energía térmica, energía emitida como “luz” en muy diversas longitudes de onda, etcétera.

## EL SOL, LA ESTRELLA MÁS CERCANA

La temperatura del núcleo del Sol es de 14 millones de grados Kelvin, mientras que la temperatura de la fotosfera es de 6 mil grados Kelvin. A la fotosfera en ocasiones se la llama *superficie solar*, pues es la capa que vemos a simple vista; a las capas que están sobre ella se les considera la *atmósfera solar*. La capa más externa de la atmósfera solar es la corona, cuya temperatura es

de 2 millones de grados Kelvin, es decir, es mucho más caliente que la fotosfera. Si algo similar ocurriera en una fogata, al alejarnos de ella la temperatura aumentaría. Por ejemplo, a diez metros sentiríamos más calor que si estuviéramos a un metro. (Claro que esto no ocurre en el caso de una fogata, aunque sí en el Sol).

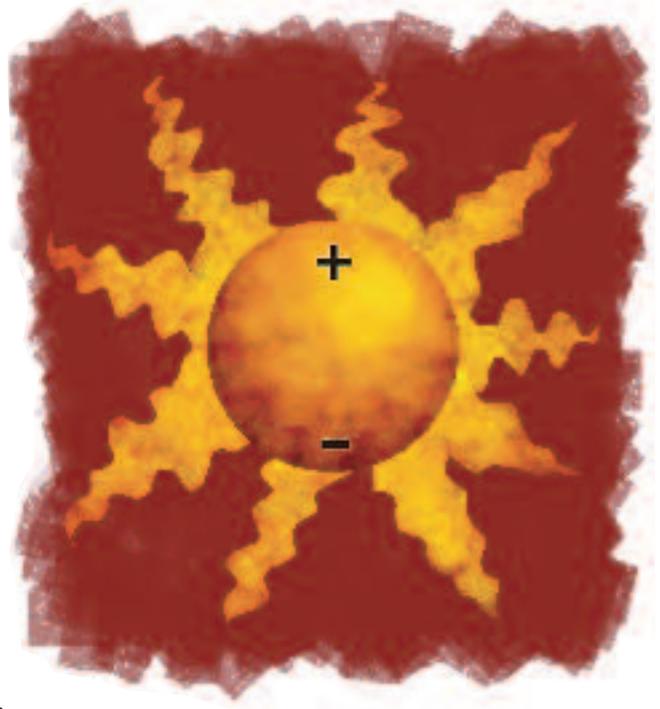
Podemos entonces preguntarnos, ¿por qué en el Sol la corona es más caliente que la fotosfera? Todavía no hay respuestas satisfactorias a esta pregunta, pero podemos tomar en cuenta un hecho interesante; en la fotosfera la energía magnética es muy grande (mucho mayor a la energía magnética en la corona). Es decir, si comparamos la energía magnética de la fotosfera con la de la corona, resulta que hay un exceso en la fotosfera. Este exceso de energía parece jugar un papel importante en el calentamiento de la corona, ya que dicho exceso podría, a través de su transformación en otras formas de energía, influir en las condiciones físicas de la corona y en particular en su temperatura.

La atmósfera solar es un ambiente en el que constantemente aparecen y desaparecen arcos magnéticos que al interactuar entre sí pueden conducir a la transformación de la energía magnética en otras formas de energía, a través de eventos explosivos tales como las ráfagas. Esta posibilidad es una de las motivaciones para estudiar los eventos en los que está involucrado el campo magnético y que pueden ser una solución a la incógnita del calentamiento de la corona.

## RADIOTELESCOPIOS

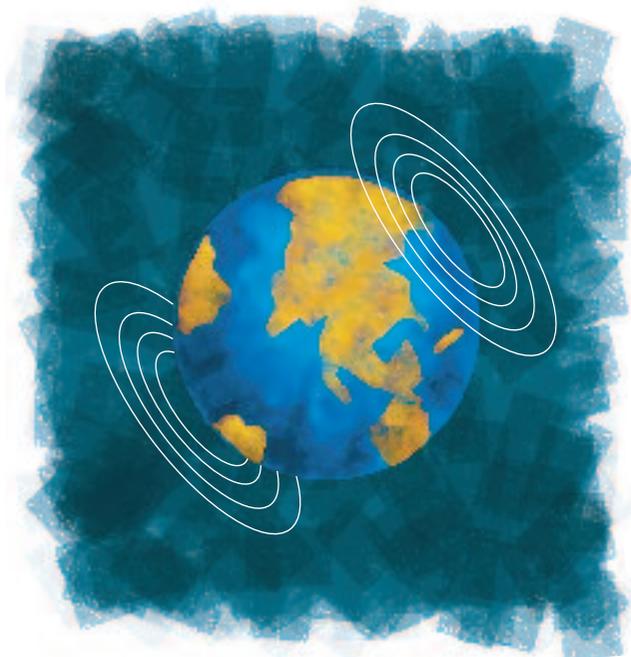
El funcionamiento de un radiotelescopio es similar al de un radio común, y básicamente tienen las mismas componentes: antena y receptor. Sin embargo, hay diferencias importantes. Una es que un radiotelescopio es muy sensible: puede captar señales extremadamente débiles. Esto se logra con grandes antenas y con receptores que amplifican mucho la señal pero que aportan muy poco ruido propio, permitiendo estudiar muchos detalles de los objetos celestes que se observan.

La capacidad de un radiotelescopio para distinguir detalles de un objeto depende en gran medida del tamaño de su antena. A la capacidad de distinguir dos objetos que están cercanos entre sí se le llama *resolución angular*. Entre mejor sea la resolución angular, más detalles se pueden distinguir. La resolución es mejor entre más grande sea la antena, y por eso quisiéramos contar con antenas que fueran lo más grandes posible. Pero, el tamaño de las antenas que se pueden construir en la actualidad



La atmósfera solar es un ambiente en el que constantemente aparecen y desaparecen arcos magnéticos que al interactuar entre sí pueden conducir a la transformación de la energía magnética en otras formas de energía, a través de eventos explosivos tales como las ráfagas

Los efectos de las ráfagas se llegan a observar prácticamente en todo el espectro electromagnético, incluyendo rayos gamma, rayos-X, rayos ultravioleta, luz visible y ondas de radio



está limitado por dificultades técnicas y por los costos de construcción. Sin embargo, se encontró una solución; emplear dos o más antenas funcionando como *interferómetro*. En estos instrumentos la resolución está determinada por la distancia entre las antenas. Actualmente hay interferómetros cuyas antenas están separadas a distancias del orden del diámetro de la Tierra. Con un interferómetro así se pueden tener resoluciones tan grandes que si con él observáramos una moneda de dos centímetros de diámetro, ¡podríamos distinguirla a una distancia de 2 mil kilómetros!

#### OBSERVACIONES DEL SOL

En febrero de 1942, durante la Segunda Guerra Mundial, los radares ingleses registraron mucha interferencia. Stanley Hey, a quien le encargaron investigar el origen de dicha interferencia, encontró que ésta no era producida por algún instrumento enemigo, sino por el Sol. Ése es el primer registro histórico que se tiene de la detección de ondas de radio emitidas por el Sol.

Se ha observado que, en ocasiones, la intensidad de la radiación solar aumenta mucho y decrece en unos cuantos minutos. Estos eventos, llamados ráfagas, generalmente ocurren en las llamadas *regiones activas* del Sol (las cuales se caracterizan por la presencia de manchas oscuras en la fotosfera).

En las ráfagas solares, las partículas del medio son aceleradas hasta alcanzar grandes velocidades (a veces tan altas que comienzan a notarse los efectos predichos por la teoría de la relatividad de Einstein). Los efectos de las ráfagas se llegan a observar prácticamente en todo el espectro electromagnético, incluyendo rayos gamma, rayos-X, rayos ultravioleta, luz visible y ondas de radio. En longitudes de onda cortas, centimétricas y milimétricas (que corresponden a ondas de radio), se observa muy bien la fase impulsiva de la ráfaga. Ésta es la fase en la que ocurre la liberación primaria de energía y por lo tanto es la que más información nos puede dar sobre las causas de las ráfagas; pero, paradójicamente, es la fase menos entendida. Se han hecho observaciones del Sol con poderosos interferómetros. Desafortunadamente, en estos instrumentos se observa el Sol unas pocas veces al año y sólo se registran unas cuantas ráfagas. Sin embargo, el Sol se monitorea diariamente con antenas más pequeñas, con las que no se obtienen imágenes pero se registran muchas ráfagas que pueden dar información detallada del com-

portamiento de las variaciones de la emisión del Sol a través del tiempo. Las ondas de radio provenientes del Sol quedan, en estos instrumentos, de una forma similar a un electrocardiograma, en el que las variaciones de la amplitud de las ondas proporcionan información sobre lo que ocurre con el paciente. En cierta forma es como si se estuviera evaluando el estado de salud del Sol.

El desarrollo de la radioastronomía solar en México ha sido muy lento, con grandes periodos de inactividad y con algunos esfuerzos aislados. Dos de estos esfuerzos se han realizado en el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE). Por otro lado, en el Instituto de Astronomía de la UNAM varios investigadores y técnicos han adquirido mucha experiencia en el desarrollo de sistemas de control de telescopios, así como en electrónica de altas frecuencias. Estudiantes, técnicos e investigadores de estas tres instituciones estamos colaborando para reconstruir un radiotelescopio cuya antena es de 5 metros de diámetro, al cual llamamos “RT5”.

#### EL RADIÓMETRO SOLAR DEL INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFÍSICA ÓPTICA Y ELECTRÓNICA

El INAOE cuenta con un radiotelescopio solar cuya antena es de un metro de diámetro y que opera en una frecuencia de 9 gigahertz, lo cual corresponde a una longitud de onda de 3 centímetros. El radiotelescopio solar de un metro se emplea para hacer observaciones regulares del Sol, así como para prácticas de estudiantes del instituto y de otras instituciones. También se ha usado para medir la interferencia en varios lugares. Actualmente el radiotelescopio de un metro se está empleando para hacer diversas pruebas para el desarrollo del proyecto del radiotelescopio de cinco metros (RT5).

#### EL RADIOINTERFERÓMETRO SOLAR DE BASE PEQUEÑA

El radiointerferómetro solar de base pequeña (RIS, Figura 1) fue construido en Rusia para estudiar las regiones activas y las ráfagas solares. El 7 de marzo de 1971 ocurrió un eclipse total de Sol cuya totalidad se observó desde la República Mexicana. En Oaxaca la totalidad del eclipse duró 6 minutos. Esto atrajo muchas expediciones científicas de diversos países. Una expedición rusa trajo un radiotelescopio solar de línea de base pequeña,

El desarrollo de la radioastronomía solar en México ha sido muy lento, con grandes periodos de inactividad y con algunos esfuerzos aislados.

Dos de estos esfuerzos se han realizado en el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE)



**Figura 1.** El radiointerferómetro solar de base pequeña (RIS). Actualmente está instalado en el Instituto de Geofísica de la UNAM.

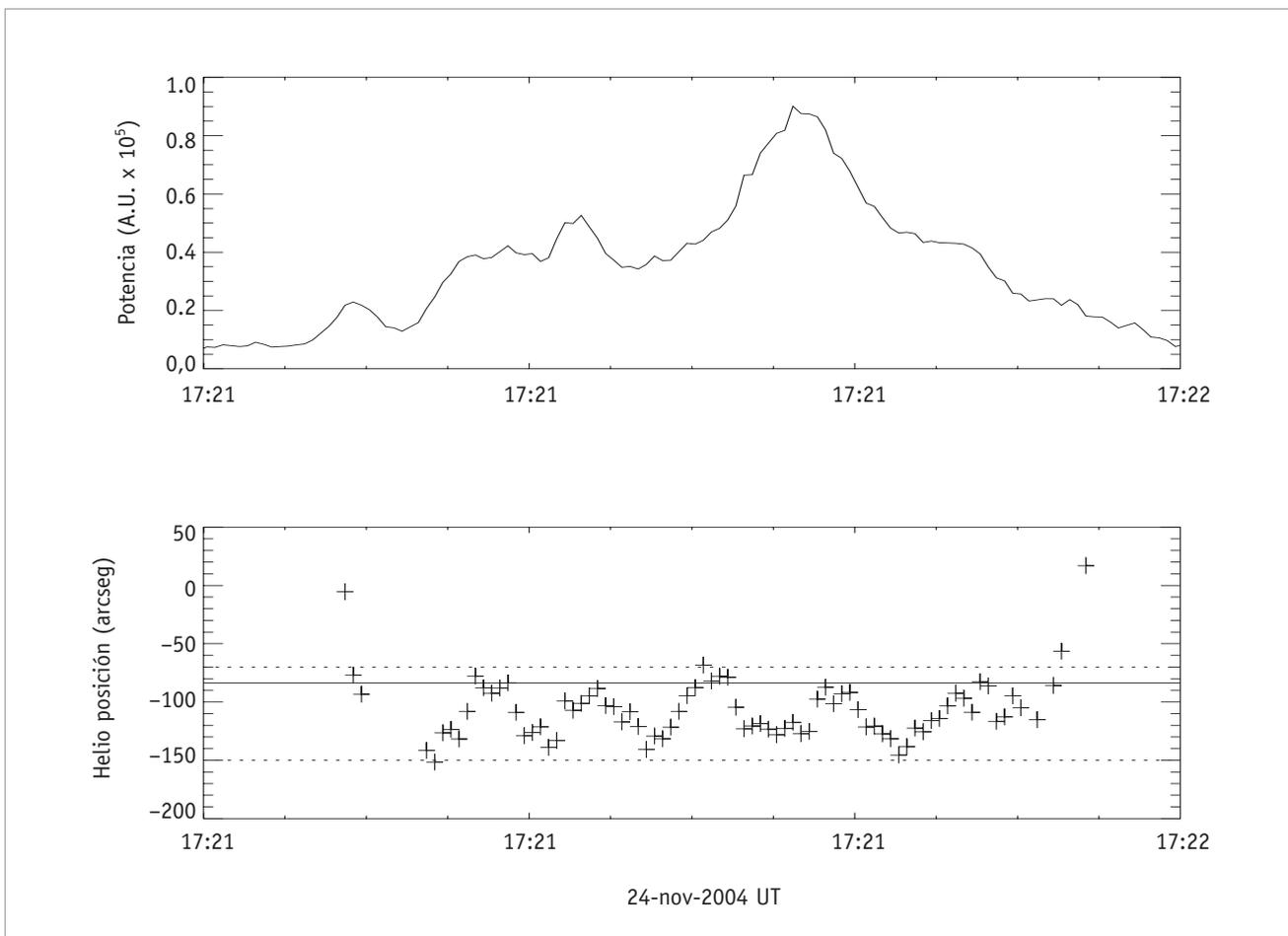
el cual posteriormente donaron al Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, y varios años después fue trasladado al Instituto de Geofísica de la UNAM, en donde se encuentra actualmente. El radiointerferómetro solar de base pequeña consta de dos antenas de un metro de diámetro separadas 5 metros.

¿Por qué usar un interferómetro para observar las regiones activas del Sol? El objetivo del radiointerferómetro solar de base pequeña es estudiar fuentes de ondas de radio mucho más pequeñas que el Sol. Sin embargo, dichas fuentes aparecen sobre el disco solar y la emisión del disco es muy intensa. Ocurre que un interferómetro es “ciego” para objetos que se encuentran en ángulos grandes respecto a él, y en el radiointerferómetro solar de base pequeña se eligió una distancia entre las antenas con la cual el interferómetro es “ciego” a la emisión del disco solar. De esa manera el radiointerferómetro puede dar información sobre

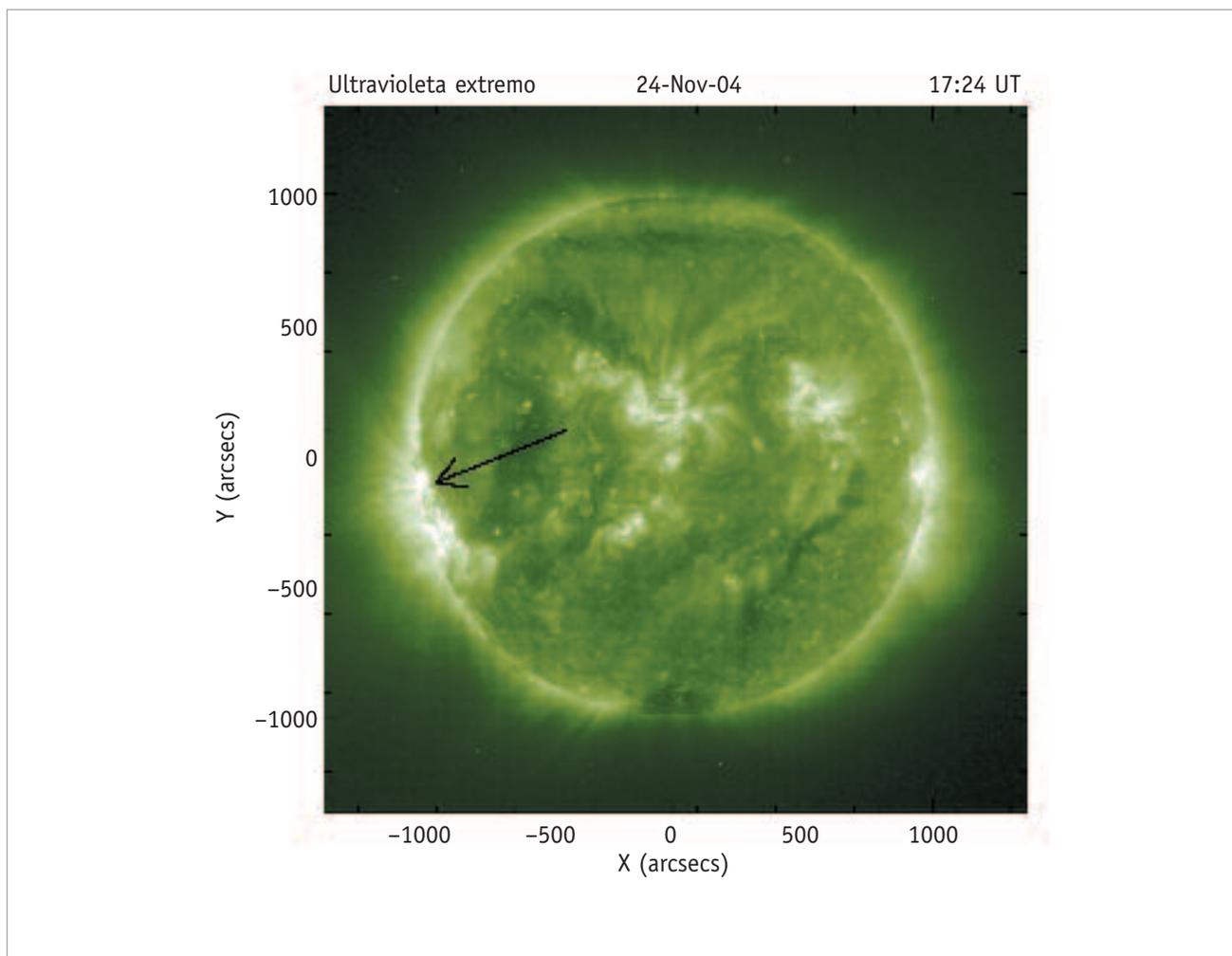
las fuentes pequeñas que están en el Sol, pero casi elimina la señal del disco solar. El radiointerferómetro solar de base pequeña también puede medir los desplazamientos de las fuentes de las ráfagas y puede detectar radiación con polarización circular, lo cual es muy importante para el estudio de los campos magnéticos involucrados en las ráfagas.

### OBSERVACIONES CON EL RADIOINTERFERÓMETRO SOLAR DE BASE PEQUEÑA

La Figura 2 muestra el registro de una ráfaga observada con el radiointerferómetro solar de



**Figura 2.** Intensidad de la fuente de la ráfaga del 24 de noviembre del 2004 (panel superior) y su posición (panel inferior) observada con el radiointerferómetro solar de base pequeña. En el eje horizontal, en ambas gráficas, se representa el tiempo.



**Figura 3.** El Sol observado en el ultravioleta extremo. La flecha indica la región activa, AR10706, en la que tuvo lugar la ráfaga del 24 de noviembre del 2004, observada por el radiointerferómetro solar de base pequeña.

base pequeña, el 24 de noviembre de 2004. En el panel superior se muestran las variaciones de la intensidad de la señal del Sol, donde el eje horizontal representa el tiempo (en horas y minutos) y el eje vertical la intensidad. Se puede ver claramente que la intensidad aumenta hasta llegar a un máximo y después decrece. En el panel inferior se grafica la posición en dirección Norte-Sur de la fuente de la ráfaga. Es interesante notar que se observan movimientos cuasi-periódicos. Estos movimientos no se pueden apreciar en la gráfica de la intensidad (panel superior) ni tampoco en observaciones con otros instrumentos (por ejemplo, en las imágenes en el ultravioleta como la que se muestra en la Figura 3). Éste es un ejemplo de las ventajas del radiointerferómetro solar de base pequeña para estu-



**Figura 4.** Vista del sitio en el que se está construyendo el radiointerferómetro solar de cinco metros (RT5), a una altura de 4 mil 500 metros sobre el nivel del mar, en el volcán Sierra Negra, en el estado de Puebla.

diar el Sol. Además, puede monitorearlo diariamente durante aproximadamente 6 horas. Los datos se publican en tiempo real y pueden ser consultados en la dirección electrónica <http://cintli.igeofcu.unam.mx>.

#### EL RADIOTELESCOPIO DE CINCO METROS

Actualmente estamos reconstruyendo un radiotelescopio cuya antena es de cinco metros de diámetro (RT5). Planeamos usarlo para observar, en longitudes de onda milimétricas, al Sol y otros objetos celestes (<http://www.inaoep.mx/~astrofi/rt5>). La radiación electromagnética de longitudes de onda milimétricas es fuertemente absorbida por la atmósfera terrestre. Por ello, para observar en dichas longitudes de onda es conveniente instalar los radiotelescopios a grandes alturas. De esa manera, el espesor de la atmósfera sobre el telescopio es menor al que se tiene desde el nivel del mar.

La Figura 4 muestra el sitio en el que se va a instalar el RT5, a una altura de 4 mil 500 metros sobre el nivel del mar, en el volcán Sierra Negra, a 7 kilómetros del Citlaltépetl (o Pico de Orizaba). La antena parabólica (Figura 5), la montura y el domo fueron donados por la Universidad de Texas en Austin. Con la colaboración de las instituciones mencionadas, y la participación de colegas de muchas otras instituciones mexicanas, se están construyendo las diversas partes del RT5.

Esperamos hacer las primeras pruebas en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica a fina-



**Figura 5.** Antena parabólica de cinco metros de diámetro del RT5, la cual está construida de una sola pieza. Actualmente está en el laboratorio de superficies esféricas del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, donde se están llevando a cabo diversos trabajos para mejorar la calidad de su superficie.



les de 2005. En una primera etapa, el RT5 operará a frecuencias relativamente bajas, empezando en 43 gigahertz. Posteriormente se construirán receptores a frecuencias más altas.

## EXPECTATIVAS

La radioastronomía constituye una poderosa herramienta para entender muchos procesos cósmicos. En particular, es fundamental para estudiar los procesos físicos que tienen lugar en la atmósfera del Sol. Con la construcción de radiotelescopios como el arreglo de centelleo interplanetario y el radiotelescopio de cinco metros de diámetro, junto con la modernización del radiointerferómetro solar de base pequeña, se abre la posibilidad de un crecimiento sostenido en el área. Mediante la participación de estudiantes en los proyectos en desarrollo esperamos formar un grupo sólido de radioastronomía solar en México.

**José Eduardo Mendoza Torres** estudió la licenciatura en física en la Facultad de Físico-Matemáticas de la Universidad Autónoma de Puebla. Hizo el doctorado en el Observatorio Astrofísico Espacial de la Academia de Ciencias de Rusia. Fue encargado del estudio de sitios en la República Mexicana para la instalación del Gran Telescopio Milimétrico. Ha sido coordinador de las dos Olimpiadas de Astronomía que se han realizado en México. Es autor o coautor de más de veinte publicaciones de investigación en Astronomía. Actualmente es responsable del proyecto de reinstalación del radiotelescopio milimétrico de cinco metros de diámetro que se está instalando en Sierra Negra. [mend@inaoep.mx](mailto:mend@inaoep.mx)

**Alejandro Lara Sánchez** estudió la licenciatura en física en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la maestría y doctorado en el Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM. Ha hecho estancias posdoctorales y sabáticas en la Universidad de Maryland, la Universidad Católica de América y el Centro Espacial Goddard, de la NASA. Ha publicado 27 artículos de investigación sobre los temas de su especialidad, que son física solar, fenómenos explosivos en la corona solar y clima espacial. [alara@geofisica.unam.mx](mailto:alara@geofisica.unam.mx)

**David Hiriart García** obtuvo su doctorado en astronomía en la Universidad de Massachusetts en Amherst. También es maestro en ciencias en la especialidad de electrónica en altas frecuencias por el CICESE. Desde 1998 trabaja como investigador del Instituto de Astronomía de la UNAM en el campo de nebulosas planetarias y flujos moleculares. Actualmente es el jefe del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, Baja California. [hiriart@bufadora.astrosen.unam.mx](mailto:hiriart@bufadora.astrosen.unam.mx)