

Este artículo apareció publicado en el Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid para el año 1994. Su apariencia puede haber cambiado al ser reprocesado con pdflatex y nuevos ficheros de estilo.

RADIOTELESCOPIOS PARA EL FIN DEL DECENIO **Javier Alcolea Jiménez**

Centro Astronómico de Yebes
Instituto Geográfico Nacional

La Radioastronomía es una ciencia relativamente joven; tradicionalmente se considera que comenzó en 1932, cuando Karl Guthe Jansky descubrió accidentalmente que nuestra Galaxia es una intensa fuente de radioondas. Esto hace que sea una ciencia todavía muy dinámica y en constante evolución, lo que se ve acentuado por los rápidos avances que se producen en las tecnologías de las telecomunicaciones, de la informática y de los nuevos materiales, ciencias fundamentales en el desarrollo de los radiotelescopios y otros equipos necesarios para el análisis de las radioobservaciones. Por esto, escribir un breve artículo divulgativo sobre toda la Nueva Generación de Radiotelescopios no es una tarea fácil. No, desde luego no hubiera resultado sencillo describir en unas pocas páginas las características fundamentales de la pléyade de radiotelescopios que acaban de entrar en funcionamiento, se encuentran en construcción, en fase de diseño o de simple mera especulación (esperando fuentes de financiación), listos para ser instalados aquí en la Tierra, ser puestos en órbita o incluso emplazados en la Luna. Por ello aquí nos ceñiremos a aquellos radiotelescopios que ahora mismo se encuentran en construcción o en una fase muy avanzada de su diseño. Se trata de media docena de instrumentos que por uno u otro motivo constituirán, en gran medida, las herramientas punteras de la Radioastronomía del futuro más inmediato. Conforme se describen las características más sobresalientes de cada telescopio, el lector se dará cuenta de los problemas con los que actualmente se enfrenta la Radioastronomía y cómo se han solucionado en cada caso. También se enumerarán las principales áreas de investigación a que será dedicado cada instrumento, lo que dará al lector una visión de algunos de los temas que centrarán la atención de los radioastrónomos en un futuro no muy lejano. Vayamos a ello.

El nuevo GBT o el ave fénix

A las 9:43 de la tarde (hora local) del 15 de noviembre de 1988, el radiotelescopio de 300 pies de diámetro (unos 90 metros) de Green Bank

(Virginia Occidental, EE.UU.) se vino abajo después de más de 25 años al servicio de la Radioastronomía; de uno de los mayores radiotelescopios del mundo tan solo quedaba un amasijo de herrajos. Por fortuna no se produjeron desgracias personales. Al día siguiente, el senador por el estado de Virginia Occidental R.C. Byrd declaraba que este suceso, aunque desgraciado, representaba una magnífica oportunidad para reemplazar ese instrumento por otro que pudiese ser útil hasta bien entrado el siglo XXI. El señor Byrd y el también senador por Virginia Occidental Rockefeller no estaban dispuestos a que su estado perdiese un puesto privilegiado en la Radioastronomía norteamericana y, en una reunión celebrada el 28 de aquel mismo mes, pedían que para comienzos del siguiente año estuviese lista una propuesta para la construcción de un nuevo radiotelescopio en Green Bank. Cuatro días más tarde, mientras los restos del 300 pies todavía seguían asentándose, radioastrónomos estadounidenses se reunían en el mismo Green Bank para discutir dicha propuesta; en junio del año siguiente estaba finalmente lista. El telescopio que desveló la naturaleza de los púlsares había pasado a formar parte de la breve Historia de la Radioastronomía pero su relevo ya estaba en camino¹.

Aunque nacido como sucesor del 300 pies, naturalmente las características del nuevo (radio)telescopio de Green Bank (abreviado GBT) son muy superiores a las de aquél. No sólo por los avances tecnológicos habidos en los últimos 30 años, sino también por el muy diferente papel a desempeñar por ambos instrumentos. Mientras que el 300 pies fue un proyecto relativamente barato y de rápida ejecución, el GBT nace con el propósito de convertirse en una de las herramientas punteras de la Radioastronomía. Aunque esto era un punto de común acuerdo entre los radioastrónomos consultados, ya en la reunión celebrada en Green Bank quedó claro que no todo el mundo quería construir el mismo tipo de telescopio. Fundamentalmente las discrepancias se centraban en su tamaño y las frecuencias a las que debía trabajar, aspectos estos muy íntimamente ligados. Parte de la comunidad radioastronómica estadounidense abogaba por la construcción de una antena única con un diámetro de unos 150 metros, capaz de operar a frecuencias de hasta 22.000 MHz (una longitud de onda de 1,3 cm); otros por el contrario apoyaban el proyecto de una antena más pequeña, de unos 70 metros, pero capaz de trabajar a frecuencias de hasta 118.000 MHz (2,5 mm). Finalmente se adoptó una solución de compromiso: la construcción de una antena de unos 100 metros con capacidad para trabajar hasta

¹El 300 pies detectó por primera vez el púlsar de la nebulosa del Cangrejo, lo que en su día supuso la confirmación de que ese tipo de objetos no son mas que estrellas de neutrones en rotación.

los 50.000 MHz, si bien no se descarta la posibilidad de que en un futuro alcance los 118.000 MHz, aunque sea con una baja eficiencia.

Otro de los temas a debate fue la localización del nuevo telescopio. A bajas frecuencias (menores o del orden de 1.000 MHz) uno de los principales problemas con que se enfrenta la Radioastronomía son las interferencias de origen artificial. En este aspecto Green Bank constituye un emplazamiento muy valioso. El observatorio se encuentra relativamente protegido frente a estas emisiones no deseadas, gracias a que en el área que lo rodea (la National Radio Quiet Zone) la instalación de dispositivos capaces de producir interferencias se encuentra sujeta al visto bueno del observatorio. De no haberse construido el GBT, el desplome del 300 pies hubiera hecho que Green Bank perdiese su importancia como observatorio radioastronómico, con lo que el mantenimiento de la Radio Quiet Zone hubiese sido de difícil justificación, por lo que ésta hubiera desaparecido a buen seguro. Por el contrario, a frecuencias altas (mayores de 80.000 MHz) Green Bank no es precisamente un lugar de observación idóneo. A estas frecuencias los fenómenos de interferencia no existen (por el momento) y lo que se tiene en cuenta a la hora de elegir el emplazamiento de un telescopio es la transparencia de la atmósfera. Ésta viene determinada por la altura de la capa de aire y por la cantidad de vapor agua. Es por esto que para el emplazamiento de telescopios de alta frecuencia se escogen sitios elevados y con un clima muy frío y seco. La baja altitud de Green Bank (830 m) hace que observaciones por encima de los 50.000 MHz resulten impracticables excepto en invierno, cuando la extremada sequedad del clima permite trabajar incluso a 118.000 MHz durante al menos unos meses al año. Comprensiblemente, los mismos astrónomos que apoyaban la construcción de una antena para bajas frecuencias apoyaban a su vez Green Bank para su emplazamiento, mientras que los partidarios de una antena más pequeña favorecían su instalación en un lugar más seco y elevado. Finalmente se escogió como emplazamiento Green Bank.

El tercer gran punto de controversia fue el diseño de la propia antena. Normalmente las grandes antenas completamente orientables tienen un diseño parecido al que se muestra en la figura 1. La radiación incidente es recogida por un reflector primario (i) en forma de paraboloide de revolución (de aquí el nombre popular de “parabólica” con que se conoce este tipo de antenas) y es reflejada hacia un reflector secundario o subreflector (ii). Éste, cuya forma es la de un hiperboloide de revolución, refleja nuevamente la radiación y la concentra en un punto (iii) que es donde se sitúan los dispositivos encargados de detectar dicha radiación: los receptores. Uno de los inconvenientes de este diseño es que el subreflector y las patas que

lo soportan producen una “sombra” en el reflector principal, lo que no sólo hace que la superficie colectora sea menor sino que además provoca que el radiotelescopio sea más vulnerable a las interferencias. Un diseño alternativo (figura 2) consiste en utilizar como reflector primario no el vértice de un paraboloide sino uno de los lados. De esta forma el subreflector no “ensombrece” al reflector primario, con lo que se gana en área colectora y en apantallamiento frente a las interferencias. En principio este segundo diseño es mejor, si bien posee otros inconvenientes, fundamentalmente que resulta un 25 % más caro que una antena de similar tamaño de diseño tradicional y que la mayor antena de este tipo que hasta la fecha se había construido era de 11,5 m; el salto hasta una antena de 100 m parecía un poco arriesgado. (Para antenas de diseño tradicional se tiene mucha más experiencia.) Esto hizo que en principio se descartase la construcción de una antena como la de la figura 2, aunque finalmente este es el modelo que se ha adoptado.

Una consecuencia de este diseño “vanguardista” es que para que el área colectora sea un círculo de 100 m de diámetro, la superficie del reflector debe tener un tamaño de unos 100×110 m, por lo que esta antena se convertirá en la mayor del mundo completamente orientable, sobrepasando a la de 100 m de diámetro de Effelsberg (cerca de Bonn, en Alemania). Para hacerse una idea de lo que esto representa baste decir que esas dimensiones son comparables a las del terreno de juego de un campo de fútbol (ahora tómese esta superficie, móntese sobre unas patas y hágasela girar de arriba a abajo y sobre sí misma). Esta superficie está formada por unos 2000 paneles metálicos, soportados por una estructura tubular, que deben situarse en su posición precisa (para que la superficie del reflector sea el paraboloide deseado) con unos errores mucho menores que la longitud de onda a la que se desea trabajar. Para frecuencias menores de 15.000 MHz, esto requiere que la precisión en la colocación de los paneles sea de 1,25 mm y se ha diseñado la antena para que cumpla este requerimiento. Es muy difícil que esa precisión pueda ser mejorada de una forma estática, por lo que para trabajar a frecuencias mayores se han de compensar las deformaciones que la estructura que soporta los paneles sufra mediante la recolocación de éstos. Esto se llevará a cabo mediante un sistema de láseres que medirán en todo momento la forma del reflector, que será corregida mediante la recolocación automática de los paneles. Para ello cada panel va provisto de una serie de motores, controlados por ordenador, que permiten variar su posición respecto de la estructura que los soporta (un sistema similar pues al que se emplea en la óptica adaptativa). Se espera que mediante este método se alcance la precisión de 0,45 mm necesaria para trabajar a

45.000 MHz.

Otra característica notable de este instrumento es la magnífica dotación de receptores (hasta un total de 19) de que dispondrá, que cubrirán de un modo continuo la banda de frecuencias que va desde los 290 MHz (1 m) hasta los 52.000 MHz (5,7 mm). Si bien sólo se podrá utilizar un receptor al tiempo, se prevé que se pueda cambiar de uno a otro en cuestión de unos pocos minutos, lo que permitirá la observación casi simultánea de un mismo objeto en un rango de longitudes de onda de más de dos órdenes de magnitud (más de un factor 100).

Los campos de la Radioastronomía que se beneficiarán de la entrada en funcionamiento del GBT (prevista para el año 1995) son muchos y variados. Su gran superficie colectora, la excelente calidad de los receptores con que va a estar provisto y el buen apantallamiento frente a radiaciones parásitas (interferencias) que proporciona el diseño adoptado harán que puedan llevarse a cabo observaciones de objetos mucho más débiles y/o mucho más lejanos. En particular se detectarán numerosos nuevos púlsares, lo que permitirá, a parte de un mejor conocimiento de estos objetos, investigar la posible existencia de una radiación gravitatoria de fondo cósmico producida en el Big Bang. También permitirá el descubrimiento de galaxias mucho más lejanas y por tanto más jóvenes, lo que los informará acerca de las primeras etapas de la evolución de estos objetos. Este telescopio también tendrá una gran importancia para el estudio de los protocúmulos de galaxias, lo que permitirá investigar los mecanismos de formación de los cúmulos de galaxias. También se prevén aportaciones fundamentales en el estudio de la radiación de fondo cósmico de microondas y en la estimación de la velocidad de expansión del Universo (medida de la constante de Hubble mediante el efecto Sunyaev-Zel'dovich). La investigación de la estructura de la Galaxia mediante la observación de hidrógeno atómico, así como de su campo magnético mediante la detección del efecto Zeeman, también se verán favorecidas por la entrada en funcionamiento del GBT. Finalmente, se espera que este instrumento potencie sobremanera la espectroscopía a longitudes de onda milimétricas y centimétricas, lo que de seguro dará lugar al descubrimiento en el espacio de numerosos nuevos compuestos químicos.

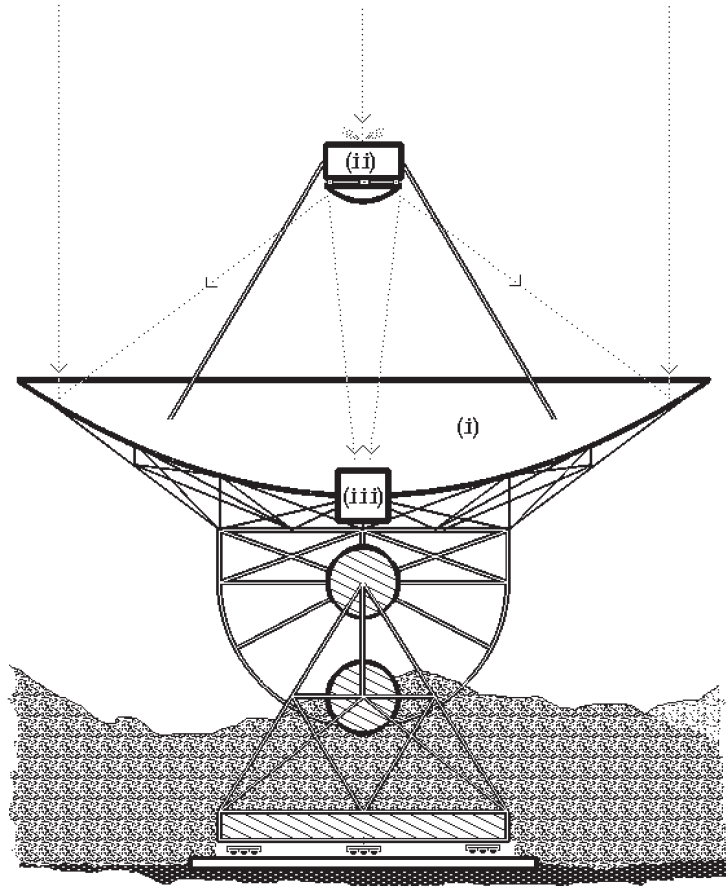


Figura 1: Esquema típico de una antena completamente orientable de diseño tradicional. La radiación incidente es recogida por el reflector primario (i), reflejada hacia el subreflector (ii) y concentrada en la localización de los receptores (iii). En este tipo de antenas parte de la radiación incidente es interceptada por el subreflector y las patas que lo soportan, lo que disminuye su eficiencia. Al mismo tiempo esto hace que sea más vulnerable a las interferencias.

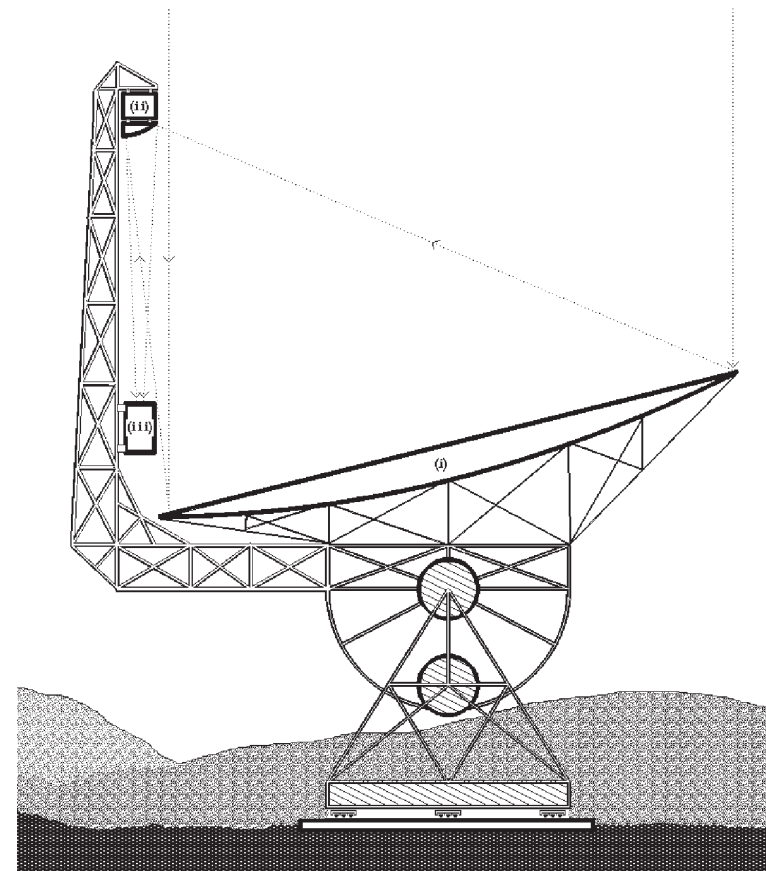


Figura 2: Esquema adoptado para el diseño del GBT. En este tipo de antenas (que no poseen un eje de simetría) el subreflector (ii) no intercepta la radiación que incide sobre el reflector principal (i), a cuyo lado se disponen los receptores (iii). Este diseño da como resultado antenas más eficientes y más resistentes a las interferencias. Por contra, el tamaño del reflector debe ser algo mayor que el de la superficie de apertura.

EL GMRT: el gigante hindú

Uno de los parámetros que caracterizan un radiotelescopio es su poder de resolución, es decir, la separación mínima que debe haber entre dos objetos para que dicha separación pueda apreciarse mediante el instrumento en cuestión. Para radiotelescopios de una única antena (como el GBT), el poder de resolución es mayor cuanto mayor es el diámetro de la antena y menor la longitud de onda a la que se trabaje. Ahora bien, ya hemos comentado que para que un radiotelescopio pueda trabajar a una determinada longitud de onda la precisión en la forma de la superficie de su reflector debe ser mucho mejor que dicha longitud de onda. Tecnológicamente esto impone unos límites al poder de resolución de este tipo de instrumentos, pues resulta imposible construir antenas de gran tamaño que puedan trabajar a longitudes de onda muy pequeñas. En la actualidad este límite se traduce en una resolución máxima entorno a los 10–15".

Una manera de solventar este problema consiste en combinar las señales captadas por diferentes antenas al igual que se combinan en una antena única las señales captadas por las distintas zonas de su reflector; a esta técnica observacional se la denomina interferometría. En este tipo de instrumentos, también conocidos como interferómetros, la resolución no está determinada por el tamaño de las antenas de que están compuestos sino por su separación, habiéndose alcanzado ya resoluciones de hasta centenares de microsegundos de arco (0"/0001). El interés que tiene el observar objetos con mayor y mayor detalle hace que en la actualidad se estén desarrollando nuevos instrumentos de este tipo.

Uno de estos nuevos interferómetros es el Giant Meterwave Radio Telescope (abreviado GMRT) que se está construyendo en la India, a unos 100 km al este de Bombay. Este instrumento estará formado por 30 antenas de 45 metros de diámetro, distribuidas sobre una región de unos 15 km de radio. La superficie colectora total del interferómetro es de más de 47.000 m², equivalente a la de una antena de 245 m de diámetro, mientras que su poder de resolución será comparable al que tendría una antena de unos 25 km. Las antenas son completamente orientables, lo que dada la latitud de su emplazamiento permitirá la observación de un 90% del cielo. La superficie colectora es la segunda mayor del mundo, tan solo por debajo de la del radiotelescopio de Arecibo (Puerto Rico), cuya antena tiene un diámetro de 300 m. No obstante la antena de Arecibo no es móvil, siempre apunta cerca cenit (se erige directamente sobre el suelo aprovechando una concavidad natural del terreno), por lo que sólo puede observar una región del cielo bastante limitada. Es por esto por lo que, para numerosos

objetos, el GMRT constituirá la mayor superficie colectora disponible para su observación.

La característica más novedosa de este radiotelescopio tal vez sea la propia estructura de las antenas. Dado que el rango de frecuencias al que va a trabajar este instrumento va de los 38 a los 1.420 MHz (longitudes de onda de 7 m a 20 cm), basta que la superficie de las antenas presente errores de únicamente 1 cm. Así mismo no es necesario que el reflector esté constituido por láminas de metal, una malla suficientemente tupida bastará. De esta forma el reflector resulta mucho más ligero y ofrece mucha menos resistencia al viento, lo que permite que pueda estar soportado por una estructura también mucho más ligera. Todo esto redundará en un menor coste del instrumento (o si se prefiere, en un mayor número de antenas por el mismo precio). En el GMRT el reflector está constituido por una malla metálica con una separación entre hilos de 1 a 2 cm. En comparación con una superficie continua, esto supondrá únicamente una pérdida de eficiencia de un 5% en el peor de los casos (a las frecuencias más altas). Esta malla metálica está soportada por un armazón constituido por 16 brazos radiales, un anillo exterior y un anillo interior, unidos entre sí por una serie de cables. Estos cables, a los cuales va fijada la malla, se tensan convenientemente de forma que dicha malla adopte la forma de un paraboloide de revolución. Mediante este ingenioso² sistema se puede conseguir una superficie reflectora con una precisión de 8 mm. Con este diseño, el peso del reflector y de la estructura que lo soporta es de tan solo 34 toneladas, frente a las 250 toneladas que pueden llegar a pesar esos mismos elementos en una antena tradicional de únicamente 25 m de diámetro. Así mismo, la fuerza que el viento ejerce sobre el reflector es comparable a la que sufre una antena de superficie continua de tan solo 22 m de diámetro. Debemos hacer notar que esta solución puede adoparse gracias también a que nunca nieva en la parte de la India en que se está construyendo este interferómetro. De lo contrario podría darse el caso de que el peso de la nieve depositada sobre el reflector hiciese colapsar la ligera estructura que lo soporta.

Otra de las ventajas del emplazamiento escogido es la relativa ausencia de interferencias. Como ya hemos comentado, a las bajas frecuencias a las que este instrumento va a trabajar debe tenerse especial cuidado con este tipo de señales parásitas. Este problema es mucho menos importante en la India que en países más desarrollados como los EE.UU. A pesar de todo,

²Los artifices de este concepto lo han denominado SMART, acrónimo de *Stretched Mesh Attached to Rope Trusses* (Malla tensada fijada a un armazón de cables), que en inglés significa precisamente ingenioso.

se tiene la intención de medir constantemente las posibles interferencias, mediante un receptor construido especialmente para ese fin, para así poder descartar las observaciones que se hayan visto severamente afectadas por esas emisiones indeseadas.

Si bien un interferómetro proporciona sin duda un poder de resolución mucho mayor que el de una antena única, presenta por el contrario el inconveniente de que es mucho menos sensible a estructuras muy extensas: es decir, se pueden realizar mapas muy detallados pero de regiones no muy grandes. En la práctica esto se traduce en la existencia de un tamaño típico para las fuentes que se pueden estudiar adecuadamente para una cierta separación entre las antenas. Esta limitación puede eliminarse mediante el uso de antenas móviles, que así pueden ser transportadas para ser dispuestas en configuraciones más o menos extendidas. De esta forma, utilizando configuraciones más o menos compactas, se pueden estudiar respectivamente objetos más o menos extensos. En el caso del GMRT esto no puede llevarse a cabo, debido a que las antenas son demasiado voluminosas como para poder ser transportadas, por lo que la disposición de las antenas va a ser fija. La solución que se ha adoptado ha sido el despliegue las antenas en una disposición mixta que permita a la vez la observación con alta y baja resolución. Doce de las antenas adoptarán una configuración relativamente compacta, repartiéndose de un modo más o menos al azar sobre una región de aproximadamente 1 km de diámetro. El resto se han situado uniformemente a lo largo de tres brazos, simétricamente dispuestos alrededor de la estructura compacta. La separación máxima de las antenas es de 25 km. El poder de resolución del interferómetro irá por tanto de 28 minutos de arco (configuración compacta a frecuencias bajas) a 2 segundos de arco (configuración extendida a altas frecuencias).

En cuanto a las líneas de investigación que se piensan desarrollar con este instrumento, destacan la observación de la línea de 21 cm del hidrógeno neutro en protogalaxias y protocúmulos de galaxias, y la búsqueda de púlsares de corto periodo. De hecho, algunas de las características del GMRT han sido concebidas pensando en estos dos proyectos, aunque no son los únicos campos que se beneficiarán de las aportaciones de este instrumento. Así, mencionar también que su alta resolución espacial permitirá el estudio de numerosos fenómenos que tienen lugar en nuestro Sistema Solar, como las emisiones radio descubiertas en Saturno por el Voyager o las regiones de actividad solar. Además de púlsares, cuyo estudio aporta una valiosísima información acerca de la estructura del medio interestelar, se pretende observar otro tipo de radioestrellas, como las estrellas variables eruptivas (UV Ceti, variables cataclísmicas, estrellas binarias

emisoras de rayos X, etc.). Así mismo, destacar las importantes contribuciones que sin duda se llevarán a cabo en Radioastronomía extragaláctica, mediante el estudio y cartografía de radiogalaxias y cuásares con muy alta resolución espacial. Finalmente, si la abundancia relativa del deuterio respecto al hidrógeno en el medio interestelar es similar a la que se ha encontrado en estrellas cercanas, la línea correspondiente a la transición hiperfina del deuterio (327 MHz, la análoga a la línea de 21 cm del hidrógeno) debe ser detectable con el GMRT. Esta detección sería muy importante, pues al haberse producido el deuterio en los primeros minutos del Universo, la determinación de su abundancia representa una pieza clave para el entendimiento de la evolución del Cosmos instantes después de su formación. Como puede verse, algunas de estas líneas de investigación son compartidas también por el GBT. En estos campos el GMRT goza de la doble ventaja de ofrecer una mayor superficie colectora y una mejor resolución espacial. De otro lado, el GBT tiene la posibilidad de observar un rango de frecuencias más amplio y no tiene limitado el tamaño máximo de los objetos que con él se pueden estudiar. En cierto modo se trata de dos instrumentos complementarios.

El SMA: captando pequeñas ondas en la gran isla

Situada en Hawaii, la mayor de las islas que forman el archipiélago de ese mismo nombre, la cima del ahora extinto volcán Mauna Kea alcanza una altura sobre el nivel del mar de más de 4200 m. Al contrario de la imagen que el lector probablemente tendrá de Hawaii, el paisaje de Mauna Kea es desolador, casi marciano, si se tiene en cuenta el tono rojizo del terreno. Hasta allí no llega el rumor de las olas ni el bullicio de los turistas en busca de lugares paradisíacos. Por el contrario, su gran altitud y su clima seco y frío hacen de este lugar un emplazamiento idóneo para la realización de observaciones a longitudes de onda submilimétricas (menores de un milímetro), ópticas e infrarrojas. Mauna Kea es en suma uno de esos lugares, como Izaña y el Roque de los Muchachos en las islas Canarias o La Silla en Chile, que se han convertido en modernas torres de Babel. Lugares en los que se apiñan telescopios de todo tipo y por los que pululan astrónomos jurando y perjurando en lenguas diversas frente a las inclemencias del tiempo, el mal funcionamiento de los instrumentos o la pésima calidad de la comida (lo que prueba que es imposible hacer las cosas a gusto de todos). Mauna Kea es también el sitio elegido por el Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) de los EE.UU. para la instalación de su futuro interferómetro submilimétrico (SubMillimeter Array, abreviado

SMA).

Como ya se ha comentado con anterioridad, a frecuencias superiores a los 40.000 MHz (longitudes de onda menores que 7 mm), la atmósfera de la Tierra deja de ser completamente transparente a las ondas radio. Esto es debido, fundamentalmente, a la presencia de moléculas de oxígeno y de agua, que absorben la radiación proveniente del espacio exterior en unos determinados rangos de frecuencias. Esta opacidad de la atmósfera empeora conforme aumentamos la frecuencia de observación, de forma que a longitudes de onda submilimétricas sólo existen ciertos intervalos de frecuencias en los que se pueden realizar observaciones radioastronómicas desde lugares muy secos y elevados. Dichos rangos de frecuencias, que se conocen también como las “ventanas submilimétricas”, se sitúan fundamentalmente entorno a los 345.000 (0,85 mm), 400.000, 490.000, 670.000 y 850.000 MHz (0,35 mm). Por encima de 1.000.000 MHz, la atmósfera se vuelve completamente opaca hasta llegar a las “ventanas” infrarrojas y óptica (ver la figura 3).

El SMA, proyecto iniciado en 1983 y que se espera esté acabado en 1996, será un interferómetro capaz de trabajar en cuatro de las ventanas submilimétricas antes citadas (todas a excepción de la de 400.000 MHz) y en la ventana milimétrica de los 230.000 MHz (1,3 mm), aprovechando las excelentes condiciones de observación que ofrece Mauna Kea. Estará constituido por un total de 6 antenas de 6 m de diámetro separadas entre sí hasta un máximo de unos 500 m, lo cual permitirá alcanzar una máxima resolución espacial de $0''1$.

Estas antenas, son de diseño tradicional, es decir similar al que se muestra en la figura 1. La superficie del subreflector estará realizada en aluminio o fibra de carbono, soportada por una estructura tubular también de fibra de carbono; el subreflector y las patas sobre las que se apoya van a ser de este mismo material. La incorporación de la fibra de carbono a la construcción de radiotelescopios está constituyendo una auténtica revolución tecnológica. Sus características hacen de él un material idóneo para la construcción de superficies reflectoras de gran precisión; en particular su bajo coeficiente de dilatación hace que sufra muchas menos deformaciones de origen térmico (debidas a dilataciones y contracciones) producidas por cambios de temperatura. Por supuesto, esto resulta vital para un radiotelescopio submilimétrico que debe trabajar a 0,35 mm (lo que requiere que la precisión del reflector sea del orden de 0,005 mm) a pesar de las duras condiciones medioambientales que deberá soportar: temperaturas mínimas de hasta 25°C bajo cero y máximas de hasta 30°C sobre cero, vientos de hasta 200 km/h y capas de hielo de hasta 7 cm de espesor.

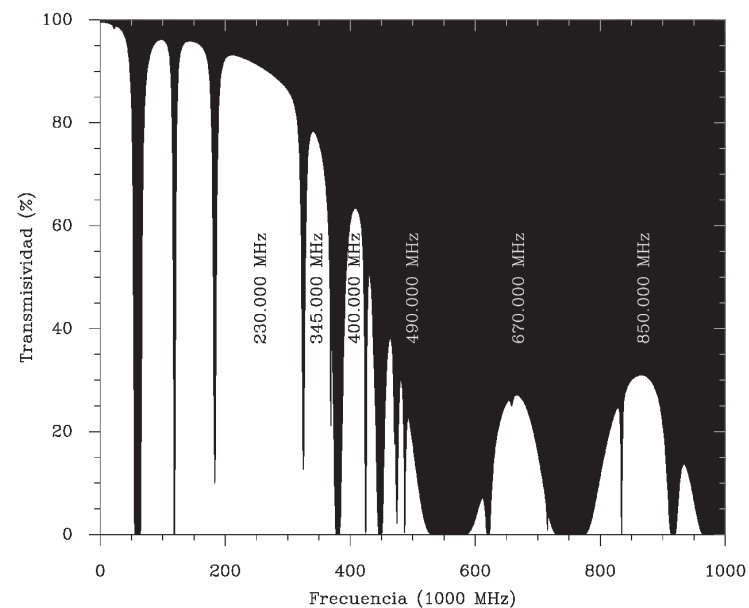


Figura 3: Transmisividad de la atmósfera (porcentaje de radiación que la atraviesa) para una cantidad de vapor agua precipitable de 1 mm. En esta figura únicamente se ha tenido en cuenta la absorción debida a las moléculas de oxígeno y agua; otras moléculas como el ozono, dióxido de azufre, etc., también contribuyen a la opacidad de la atmósfera pero en mucha menor medida. Puede verse como la transparencia de la atmósfera disminuye al aumentar la frecuencia. Se ha señalado la localización de las “ventanas submilimétricas”.

Estas antenas son móviles, lo que permite que sean dispuestas en configuraciones distintas, con lo que el interferómetro podrá llevar a cabo el estudio de objetos con diferentes tamaños característicos. Se han proyectado cuatro diferentes configuraciones, que corresponden a una separación máxima entre las antenas de 32, 80, 200 y 500 m aproximadamente. Estas configuraciones se han diseñado de forma que estén optimizadas para trabajar no sólo con seis antenas sino también con doce, en el caso eventual que este interferómetro duplicara su número de elementos. Se tienen por tanto 6×4 posibles emplazamientos para las antenas, cada uno de los cuales tiene que estar convenientemente equipado (anclajes, toma de corriente, entrada y salida de señales para el control de la antena y receptores, salida de la señal captada, etc.). El desplazamiento de las antenas se llevará a cabo mediante la utilización de una especie tractor, diseñado especialmente para este fin, que se encargará de remolcar las antenas (una a una). Este tractor se mueve sobre ruedas convencionales de neumáticos, lo cual permite que el transporte de las antenas se efectúe por caminos no asfaltados. (En en la mayoría de los interferómetros el transporte de las antenas se efectúa sobre carriles de hierro, el relativo pequeño tamaño de los elementos de este instrumento hace que esto no sea necesario, con el consiguiente abaratamiento del proyecto.)

El primer gran reto con que se enfrenta este instrumento es la propia construcción de los receptores necesarios. La tecnología empleada en la construcción de receptores a frecuencias por debajo de los 400.000 MHz está hoy en día bastante desarrollada, lo que garantiza la construcción en serie de receptores con una sensibilidad aceptable. Por el contrario, a frecuencias mayores no existe tanta experiencia, situación que es tanto peor cuanto mayor es la frecuencia de trabajo. Por ello, se piensa instalar en una primera fase únicamente receptores a 230.000 y 345.000 MHz; con posterioridad, conforme el desarrollo tecnológico lo vaya permitiendo, se irán instalando receptores capaces de operar a mayores frecuencias. Las antenas se han diseñado de forma que puedan albergar hasta un total de ocho receptores distintos, si bien en principio sólo se piensa instalar seis (en la banda de 345.000 MHz se quiere instalar dos receptores con polarizaciones distintas). Los receptores se dispondrán en una especie de tambor de forma que, mediante la rotación de los espejos que dirigen la radiación captada por el paraboloide hasta la sala de receptores, se pueda seleccionar un receptor u otro. Este sistema de espejos se encarga además de dividir la radiación incidente en dos haces que pueden ser encaminados a dos receptores distintos. Como veremos, la posibilidad de poder llevar a cabo observaciones en dos receptores simultáneamente, en particular a

alta y baja frecuencia, es de vital importancia a la hora de la realización de mapas con máxima resolución ($0''1$)

El otro reto al que se va a enfrentar este instrumento será alcanzar la máxima resolución angular posible ($0''1$). El método por el que se generan mapas de un objeto mediante su observación por un interferómetro supone que la radiación incidente es una onda plana. Esto es así si el objeto observado está muy lejos del telescopio y si no existen inhomogeneidades en el medio que la radiación debe recorrer hasta ser detectada por el interferómetro. Desgraciadamente esto último no es así, fundamentalmente por las irregularidades que presenta la propia atmósfera. En Astronomía óptica estas inhomogeneidades dan origen al conocido centelleo, que se debe mayormente a fluctuaciones de tipo térmico; en Radioastronomía milimétrica y submilimétrica, por el contrario, el correspondiente centelleo se debe a las inhomogeneidades en el contenido de vapor de agua. En ambos casos el resultado final es el mismo: una resolución espacial más pobre (o lo que es lo mismo, mapas de peor calidad). A longitudes de onda submilimétricas este efecto es tan importante que no puede en modo alguno despreciarse, a pesar de las excelentes condiciones de observación que reúne Mauna Kea. Afortunadamente existen métodos para estimar y corregir los errores debidos a esas inhomogeneidades. Aunque estos procedimientos son mucho más fácilmente aplicables a bajas frecuencias (230.000 MHz), una vez conocidos sus efectos para un receptor pueden calcularse los que tienen en otro, de aquí la importancia de poder realizar observaciones simultáneas con dos receptores a la vez (en particular a baja y alta frecuencia). En todo caso se ha estimado que al menos en un 15% del tiempo se tendrán condiciones que permitan alcanzar resoluciones del orden de $0''5$ incluso si no se pueden determinar los errores debidos a las inhomogeneidades de la atmósfera. Si por el contrario se pueden corregir de algún modo esos errores, esa resolución podrá aumentarse hasta los $0''1$.

A fin de obtener el máximo rendimiento de este instrumento, y debido por otra parte a que únicamente una pequeña fracción del tiempo va a poder ser dedicada a la realización de observaciones a alta frecuencia y/o con gran resolución espacial, la consecución de los diversos proyectos de investigación se llevará a cabo de un modo flexible. Así, la mayor parte del tiempo el instrumento se dedicará a la realización de proyectos que no requieran observaciones a alta frecuencia y/o con alta resolución espacial, pasando a llevarse a cabo este tipo de observaciones tan pronto como las condiciones climatológicas lo permitan. Debido a la corta duración de estos periodos de tiempo excelente (y a su impredecibilidad: la experiencia dice que con frecuencia se dan inmediatamente después de las peores tor-

mentas), para que puedan ser aprovechados al máximo el interferómetro se ha diseñado de forma que pueda cambiarse de configuración y de frecuencia de observación sin perder mucho tiempo; es decir, se ha diseñado el instrumento para que sea extremadamente ágil. Esta flexibilidad del programa de observación, unida al hecho habitual en interferometría de que se tarda bastante tiempo (varios meses) en la consecución de un determinado proyecto, hace que sea innecesaria la presencia del observador al pie del telescopio (no puede decidir que hacer a continuación en función de los resultados que se van obteniendo). En Mauna Kea sólo estará presente el personal técnico y científico encargado de mantener en operatividad el instrumento. Esto representa sin duda una gran ventaja para el astrónomo, pues Hawái está muy lejos de casi cualquier otro sitio y los viajes hasta allí además de caros acaban resultando muy molestos. (Claro que, desde otro punto de vista, esto bien puede resultar un inconveniente; en caso de mal tiempo se acabó el consuelo de, por lo menos, poder disfrutar de unas horas en las magníficas playas hawaianas.) Por todo ello se piensa dotar al instrumento de un completo control remoto, a fin de que el astrónomo pueda comprobar la marcha de las observaciones y que el personal del SAO no desplazado a Hawái (la sede del SAO se encuentra cerca de Boston, en la costa atlántica de los EE.UU., a más de 7.000 km de distancia de Mauna Kea) pueda controlar en todo momento la totalidad del instrumento (cambiar de frecuencia, orientar las antenas hacia una posición determinada, cambiar el objeto observado, etc.).

Finalmente, como en los anteriores casos, los campos de la Astronomía que van a verse fuertemente afectados por la entrada en funcionamiento de este nuevo y potente telescopio son numerosos. La importancia de este instrumento viene dada fundamentalmente por las altas frecuencias a las que va a trabajar, un campo todavía no muy bien explotado y que por lo tanto aún puede deparar grandes sorpresas, y por su alta resolución angular, lo que permitirá el estudio de objetos pequeños y/o lejanos o de objetos extensos con mucho detalle. (Debe tenerse en cuenta que en el óptico, debido al fenómeno del centelleo, desde la Tierra sólo se alcanzan resoluciones de ese orden si se utilizan técnicas especiales como la óptica adaptativa.) Comenzando por los objetos más cercanos, podemos destacar las contribuciones que sin duda se llevarán a cabo al mejor conocimiento de las atmósferas de los planetas. En este campo es de vital importancia la realización de mapas con relativa rapidez, debido al corto periodo de rotación de los planetas mayores (del orden de 10 horas), lo cual será posible gracias a la alta sensibilidad del instrumento. De esta forma se podrán llevar a cabo verdaderos estudios de la meteorología de los diversos

planetas. También se podrán estudiar las atmósferas de satélites como Titán o Io, así como cometas y asteroides.

En nuestra propia galaxia destacan los estudios que acerca de las regiones de formación estelar podrán llegar a realizarse. Por ejemplo, es bien conocido que los objetos relativamente jóvenes suelen presentar intensas eyecciones de material. Estas eyecciones son fundamentalmente bipolares, es decir, se producen mayormente en dos direcciones diametralmente opuestas (a lo largo de un eje de simetría). Para explicar la bipolaridad de estas eyecciones se ha propuesto la existencia de estructuras, con forma de disco o de rosquilla, que canalizarían la pérdida de materia a lo largo de un eje. Se calcula que el tamaño de esas estructuras debe ser de varias unidades astronómicas, por lo que se necesitan resoluciones mejores que un segundo de arco para que puedan ser detectadas a distancias de hasta 1 kpc.

Alejándonos un poco más de nuestro entorno entramos en el campo de los estudios extragalácticos. Aquí, la alta resolución de este instrumento permitirá observar con muchísimo más detalle estos lejanos objetos. Así se podrá estudiar la estructura espiral de galaxias, tanto mediante su emisión molecular debida a las nubes moleculares, como mediante la emisión en el continuo debida a los granos de polvo relativamente calientes que rodean a las estrellas más jóvenes. De otro lado, para galaxias con un corrimiento al rojo $z=1-2$, la emisión de CII (carbono atómico ionizado) cae a longitudes de onda submilimétricas y por lo tanto podría ser observada con el SMA. Esta emisión es de particular importancia, pues se cree que representa hasta un 50% de la emisión total de las galaxias en el infrarrojo y por lo tanto debe ser muy intensa, lo que permitirá el estudio de galaxias muy lejanas.

EL MMA: un interferómetro para el siglo que viene

Si el SMA encontró sitio donde emplazarse en la ya bastante abarrotada cima del Mauna Kea, éste no será el caso del nuevo interferómetro milimétrico (MMA) que el NRAO estadounidense está proyectando y que (de realizarse) constituirá una de las herramientas más potentes de la Radioastronomía en el inicio del próximo siglo. La gran extensión de terreno sobre la que se situarían sus elementos, un círculo de 3 km de diámetro, imposibilita que pueda ser emplazado en Mauna Kea. Este proyecto todavía se encuentra en fase de estudio, no habiéndose decidido aún si va a ser realizado o no. La fase de estudio preliminar se encuentra prácticamente acabada, por lo que la decisión final va a ser tomada en un futuro próximo. Si se sigue adelante con el proyecto, éste comenzará con un plan de desar-

rollo que se espera finalice hacia 1996, fecha a partir de la cual comenzaría la construcción del interferómetro propiamente dicha. Se trataría pues de un instrumento para el siglo XXI.

Este interferómetro constaría de un total de 40 antenas con un diámetro de 8 m, lo cual supone una superficie colectora equivalente a la de una sola antena de unos 50 m de diámetro. Estas antenas se podrían disponer en cinco configuraciones distintas; desde la más compacta posible (sin que las antenas colisionen unas con otras) hasta la más extendida, en la que se situarían lo largo de una circunferencia de 1,5 km de radio. Esto permitirá que se alcance, a la frecuencia de trabajo más alta (340.000 MHz), una resolución de $0''07$, mejor que la del Hubble Space Telescope. De otra parte, el elevado número de antenas planeado haría posible que se obtuviesen mapas en muy poco tiempo, casi de un modo instantáneo.

Este telescopio se construiría para la realización de radioobservaciones (interferométricas) a longitudes de onda milimétricas, más concretamente desde los 30.000 MHz hasta los 350.000 MHz. Este rango viene determinado por dos hechos. En primer lugar, a frecuencias más altas ya hemos visto las dificultades que existen hoy en día para la construcción de receptores y las condiciones climatológicas tan extraordinarias que se requieren para la realización de observaciones submilimétricas. Por otra parte, a frecuencias más bajas ya existe el VLA, interferómetro compuesto por 27 antenas de 25 m de diámetro para el que está previsto en un futuro próximo incluso su funcionamiento a frecuencias entorno a los 45.000 MHz. El campo de trabajo del MMA sería por tanto el comprendido entre los del VLA y del SMA.

A pesar de que no se prevé que este instrumento trabaje a frecuencias mayores de los 350.000 MHz, su emplazamiento exige desde luego la elección de un lugar seco y relativamente alto. Hasta la fecha no se ha tomado una decisión final sobre cuál sería el lugar más conveniente. Se barajan tres posibles lugares, todos ellos situados en el sur de los EE.UU.: los montes Magdalena en Nuevo Méjico, Springerville y Alpine, estos dos últimos en Arizona. Todos ellos están situados bastante cerca del emplazamiento del VLA, en lugares por encima de los 3.000 m de altitud, si bien cada uno tiene sus pequeñas ventajas e inconvenientes. Springerville es el emplazamiento más amplio y por tanto el que menos problemas plantea a la hora de disponer las antenas en su configuración más extendida. Se trata de una meseta de $10 \times 10 \text{ km}^2$ que se utiliza fundamentalmente para que pascen el ganado aunque también es un sitio frecuentado por campistas en verano. Alpine no presenta problemas de espacio para configuraciones de 3 km, si bien resulta imposible extender aún más la distancia entre las

antenas. El lugar en los montes Magdalena no permite disponer las antenas a lo largo de una circunferencia sino que deberían situarse a lo largo de brazos más o menos irregulares, aunque esto tampoco es muy grave; sí permitiría en cambio una hipotética extensión del interferómetro hacia las llanuras de San Agustín (donde se encuentra emplazado el VLA). Este lugar es una reserva para la investigación atmosférica (sobre todo acerca de las tormentas) y astronómica. Finalmente, puntos fundamentales a la hora de escoger un emplazamiento u otro serán la calidad de la atmósfera y el impacto medioambiental que originaría la construcción del instrumento. Estos estudios están a punto de finalizar por lo que se espera que se tome una decisión definitiva hacia finales de 1993.

En cuanto a las características de las antenas y las configuraciones, todavía no están completamente definidas. Lo que sí está claro es que las antenas deben requerir el menor mantenimiento posible debido a su gran número. La precisión de la superficie debe ser de al menos unas 25 micras, de forma que puedan llevarse a cabo observaciones en la ventana de los 350.000 MHz. Los efectos de la temperatura sobre las antenas (debidos a las dilataciones y contracciones) se están estudiando mediante simulaciones por ordenador. Para esto hace falta conocer las diferencias de temperatura que se darán entre los distintos puntos de la antena, lo cual es muy difícil de predecir. Para estudiar mejor este problema se ha previsto la instalación de sensores (termómetros) que midan la distribución de temperaturas en antenas similares ya existentes. Para el desplazamiento de las antenas se necesitarán, al menos, tres aparatos tractores, a fin de que los cambios de configuración puedan llevarse a cabo en un tiempo razonable (uno o dos días). El transporte de las antenas se efectuará sobre carriles o sobre carretera dependiendo del sitio elegido y su orografía (los sitios más agrestes necesitarán la construcción de vías de ferrocarril para garantizar un desplazamiento seguro de las antenas). Además, el mecanismo tractor debe poseer una alta maniobrabilidad, a fin de que puedan disponerse las antenas en una configuración muy compacta.

Como ya comentamos, uno de los problemas de un interferómetro suele ser la pérdida de información acerca de las estructuras muy extensas. Esto se soluciona en parte mediante la disposición del instrumento en configuraciones con extensiones distintas. Sin embargo, esto presenta una limitación, pues no se pueden juntar las antenas tanto que éstas colisionen entre sí, lo que hace que normalmente se tengan que utilizar datos de otros instrumentos (de antena única) para recuperar la información debida a las estructuras a gran escala. Para solventar este problema el MMA se va a construir de forma que cada una de las antenas también pueda trabajar como

antena única. Esto permitirá la realización de mapas de menor resolución (la correspondiente a una antena de 8 m) muy rápidamente, puesto que se podrían observar 40 puntos distintos a la vez (haciendo que cada antena apunte a un sitio diferente). Esta versatilidad de operación hace que incluso se contemple la posibilidad de que en caso de que no sean necesarias todas las antenas para observar un objeto (porque éste sea suficientemente intenso), parte de ellas podrían dedicarse a la observación de otros objetos del mismo proyecto o incluso de proyectos distintos, lo que daría a este instrumento una capacidad de observación realmente muy importante. Por supuesto, todo esto requiere un sistema de control de telescopio múltiple ($\times 40$) y un complejo programa de observación.

Finalmente, también se necesita realizar un considerable esfuerzo en la confección de los programas de análisis que permiten transformar los datos brutos (tal y como se captan en las antenas) en los mapas definitivos del objeto que se está estudiando. La velocidad a la que este instrumento suministraría datos es tal que, en algunos casos, la información necesaria para la confección de los mapas estaría lista en un par de horas. Por esto es de vital importancia que los programas de análisis de datos sean rápidos y los más automáticos posible. Esto permitiría al astrónomo modificar su plan de observación en función de los resultados que se fueran obteniendo. Este sistema de trabajo es el habitual en los telescopios de antena única, en los que la transformación de los datos es sencilla y se efectúa con rapidez. Por el contrario, actualmente esto no puede llevarse a cabo en interferómetros pues la velocidad de toma de datos no lo permite. Este gran esfuerzo de programación, que ya ha sido iniciado, constituye un proyecto que será llevado a cabo con independencia de la construcción del MMA o no. En este proyecto colaboran, además del NRAO, otras instituciones interesadas en disponer de tal conjunto de programas (porque disponen de algún tipo de interferómetro o son frecuentes usuarios de estos aparatos). En el fondo se trata de revisar profundamente los programas ahora existentes y adaptarlos para que saquen el mayor rendimiento posible de los últimos avances en el campo de la informática (ordenadores cada vez más veloces, inteligencia artificial, etc.).

Para finalizar, y sin ánimo de ser repetitivo aunque pueda parecerlo, los campos de interés astrofísico en los que la entrada en funcionamiento de este instrumento supondría una auténtica revolución son muy diversos. Por un lado debe destacarse la gran sensibilidad de que se dispondría dada la enorme superficie colectora total proyectada. De otra parte, su alto poder de resolución unido a su capacidad para trabajar como 40 antenas individuales hacen de él un instrumento ideal para la realización de cartografías a media,

alta y muy alta resolución. Por enumerar algunos de los puntos que sin duda centrarán la atención de los futuros usuarios de este instrumento citaremos la determinación de la velocidad de expansión del Universo mediante la combinación de medidas del efecto Sunyaev-Zel'dovich y de la emisión de rayos X de galaxias. Estudio de la formación y origen de las galaxias: protogalaxias. Observaciones de alta resolución de cuásares y galaxias con núcleos activos. Estudio de la formación estelar en galaxias externas. Estudio de diversos tipos de estrellas: novae, Wolf-Rayets, binarias, estrellas evolucionadas. Investigación de la corona, filamentos, zonas de actividad y manchas solares. Formación estelar, existencia de discos alrededor de estrellas jóvenes, estructura de las regiones de formación estelar. Química interestelar. Y un largo etcétera.

AST/RO y COBRA: la Antártida, una nueva frontera en Radioastronomía

La descripción de los anteriores instrumentos habrá permitido al lector darse cuenta de la importancia que tiene la óptima elección del emplazamiento de un radiotelescopio y el factor condicionante que, a longitudes de onda milimétricas y submilimétricas, representa la calidad de la atmósfera. Ya hemos visto como esto ha hecho que se escojan sitios como Mauna Kea para construcción de este tipo de aparatos, a pesar de que estos lugares presentan sin embargo algunos inconvenientes, como su difícil acceso, su aislamiento y las duras condiciones de trabajo. Por ahora (y hasta que se llegue a la instalación de instrumentos fuera de la atmósfera terrestre que requieran la presencia de personal para su funcionamiento) el lugar más remoto, de más difícil acceso y en el que las condiciones de trabajo resultan más duras en el que se han construido radiotelescopios (y telescopios en general) es sin duda la Antártida.

¿ Por qué instalar un radiotelescopio en la Antártida ? Fundamentalmente por las excelentes (en términos radioastronómicos) condiciones atmosféricas que allí se dan, mucho mejores que las de Mauna Kea. Por una parte, la placa de hielo que cubre la Antártida alcanza una altitud de más de 2.800 m en el Polo Sur, en cuyas cercanías se encuentra la base permanente que se ha venido utilizando (y se piensa seguir haciendo en el futuro más inmediato) para la instalación de radiotelescopios. De otra parte, la atmósfera de la Tierra es mucho más delgada en los polos, de forma que en términos de cantidad de aire por encima del lugar de observación, esta altitud equivale a una de unos 3.500 m a latitudes más ecuatoriales. (También existen planicies situadas a más de 4.000 m en las que la atmósfera es

similar a la existente en montañas con más de 5.000 m de altura). Por otra parte, las extremadamente bajas temperaturas hacen que prácticamente todo el agua se encuentre en forma de hielo y que se den cifras de cantidad de agua precipitable (la cantidad de precipitación que se acumularía si se convirtiese en lluvia todo el vapor de agua contenido en la atmósfera) por debajo de 1 mm durante todo el año (el promedio anual es de 0,5 mm)³. Estos niveles pueden ser aún más bajos durante los meses correspondientes al invierno austral, es decir, de abril a septiembre, llegándose incluso a cifras de únicamente 0,05 mm de cantidad de agua precipitable. Además la atmósfera es muy fría, lo que hace que el cielo sea mucho más “negro”, es decir, que emita menos radiación. Todo esto hace de la Antártida un lugar ideal para la realización de observaciones en el rango de longitudes de onda comprendido entre 1 mm (330.000 MHz) y 0,001 mm (infrarrojo cercano).

Por contra, existen otros muchos factores que limitan la utilización de la Antártida como lugar de observación. El más importante es sin duda el hecho de que el acceso al interior del continente es muy difícil, especialmente durante el invierno austral (nuestro verano). Existen únicamente siete aviones Hércules encargados de abastecer la base permanente instalada cerca del Polo Sur. Estos aviones llegan a realizar un total de unos 150 vuelos al año, que en su mayoría se emplean para abastecer de combustible a la base (combustible necesario para proveer de energía a toda ella: calefacción, energía para el funcionamiento de los equipos, alumbrado, agua caliente, etc.). El transporte de personal puede efectuarse durante el verano austral, por lo que si bien ésta es la peor época para la realización de observaciones radioastronómicas, es el momento en el que pueden instalarse nuevos equipos, reparar los ya existentes, realizar pruebas, etc. Una vez que el verano acaba, el personal que queda en la base debe permanecer en ella por espacio de seis meses, debiendo ser capaz de solventar los problemas que durante ese tiempo surjan. Como puede apreciarse no se trata precisamente de Hawaii (las playas), ni tan siquiera de sus volcanes extintos (Mauna Kea).

A pesar de esto, ya se han realizado radioobservaciones con éxito desde la Antártida, si bien hasta la fecha no se había tratado en ningún caso de instrumentos permanentes. Estos proyectos no se han restringido al estudio de cuerpos celestes, sino que también han abordado otros problemas como el de la abundancia del ozono en el Polo Sur. Ahora, en cambio, sí existen planes para la instalación de dos radiotelescopios que funcionen

³De hecho la sequedad es tal que uno de los factores de riesgo más importantes es el de peligro de incendio.

de forma continuada: AST/RO (Antartic Submillimeter Telescope/Remote Observatory) y COBRA (COsmic Background Radiation Anisotropy).

AST/RO es un radiotelescopio constituido por una antena única de 1,7 m de diámetro capaz de trabajar a frecuencias de hasta 1 THz (1.000.000 MHz ~ 0,3 mm, ya en la frontera con el infrarrojo lejano). Para ello la superficie reflectora del telescopio tiene un error medio de únicamente 0,015 mm. Este telescopio está siendo construido por el SAO y se espera esté listo para funcionar en enero de 1994. En una primera etapa se le dotará con receptores en las ventanas (sub)milimétricas de los 230.000 y los 490.000 MHz; la construcción de receptores a frecuencias más altas (que sólo podrán ser utilizados en los meses de buen tiempo) está siendo desarrollada por el Jet Propulsion Laboratory de los EE.UU. y no se prevé su instalación a corto plazo. El control de este telescopio se llevará a cabo de un modo completamente remoto; el astrónomo que haga uso de él no tendrá que desplazarse hasta la Antártida para ello. En el helado continente sólo se prevé la presencia de una persona que se encargará de mantener el instrumento en operatividad.

El pequeño paraboloide de revolución con que se ha dotado a este instrumento hace que su poder de resolución sea muy bajo, lo que permite realizar mapas de gran tamaño (si bien sin mucho detalle) a una velocidad relativamente alta. Esto condiciona en gran medida el tipo de objetos que se pretende estudiar mediante esta antena única. Fundamentalmente se llevará a cabo la cartografía de nubes moleculares mediante la observación de la emisión de moléculas como el monóxido de carbono (CO) o del carbono atómico (CI), ambas sustancias muy abundantes en este tipo de objetos. Por otra parte, en galaxias lejanas, la emisión (corrida al rojo por efecto Doppler) del carbono ionizado (CII) y del oxígeno atómico (OI) caen en la banda de trabajo de este instrumento. Como ya hemos comentado anteriormente, este tipo de emisiones dan cuenta de la mayor parte de la luminosidad de las galaxias en el infrarrojo, por lo que constituyen una herramienta fundamental para el estudio de galaxias con un corrimiento al rojo elevado (muy lejanas). Además podrán llevarse a cabo estudios sobre la atmósfera terrestre, en particular sobre especies tan interesantes como el ozono (O₃). Finalmente, aparte del interés indudable de estos campos de trabajo, este instrumento también servirá como experimento inicial para el estudio de la construcción de un radiotelescopio mayor (de 15 o 30 m de diámetro) a fin de explotar en mucha mayor medida las cualidades de la Antártida como plataforma para observaciones submilimétricas.

En cuanto a COBRA, este instrumento consiste en una antena única (aunque existen planes para su transformación en un interferómetro) de

3 m de diámetro, capaz de trabajar a longitudes de onda entre 3 mm y 0,5 mm. El propósito fundamental de este radiotelescopio será el estudio de las posibles irregularidades de la radiación cósmica de fondo a escalas angulares de unos 15 minutos de arco. Este campo de investigación ha experimentado últimamente un renovado interés gracias a la publicación de los resultados obtenidos por el COBE (COsmic Background Explorer), un satélite destinado a la investigación de este mismo problema a escalas angulares bastante mayores (20°). Recientemente, el equipo de científicos que se encarga del análisis de los datos suministrados por COBE ha comunicado, por primera vez, la detección, aunque de forma tentativa, de la existencia de inhomogeneidades en la radiación de fondo. Según esos autores, estas inhomogeneidades nos estarían mostrando las primeras estructuras materiales que se formaron después del Big Bang que dio origen al Universo. COBRA se va a centrar en el estudio de este fenómeno a menor escala angular, lo que aportará una valiosísima información sobre la evolución del Universo en etapas posteriores.

Y hasta aquí esta, me temo no tan breve, descripción de media docena de nuevos instrumentos que, de una u otra forma, desempeñaran un papel clave en la Radioastronomía de un futuro a medio y largo plazo. Tengo claro que no están todos los que son, que se han quedado algunos en el tintero por uno u otro motivo, si bien sí son todos los que están. Espero que el lector haya podido además hacerse una idea de los problemas que aborda la Radioastronomía en la actualidad y los métodos que emplea para resolverlos, de las esperanzas que tiene depositadas en un futuro más o menos lejano y de los caminos por los que discurrirán las líneas de investigación del próximo siglo, aparte de las sorpresas que el uso de nuevos rangos de frecuencias y de instrumentos más potentes nos pueda deparar.