

Este artículo aparecerá publicado en el Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid para el año 2005.

# RETOS Y PROYECTOS DE LA RADIOASTRONOMÍA ACTUAL

**Rafael Bachiller García**

*Observatorio Astronómico Nacional  
Instituto Geográfico Nacional*

## **Abstract**

Radioastronomy is often the unique way to study many hot topics of contemporary Astrophysics, for instance the formation and early evolution of planets, stars, and galaxies. This, together with the high interest of the involved technologies (microwaves, communications, cryogenics, microelectronics, etc.), has driven a big global effort for putting in operation new radio-observatories which will revolutionize our current understanding of the Universe. Spain is contributing to this collective effort in a significant manner. On one side, there is an important purely national research program which includes important developments such as the construction of the new 40 m radiotelescope of OAN/IGN in Yebes. On the other side, there are important contributions to large multinational projects such as the VLBI European Network, IRAM, HERSCHEL/PLANCK, ALMA and SKA. These activities should favor an optimum return to the national astronomical community both at the scientific and the technological levels.

## **Introducción: el universo frío**

La Astrofísica contemporánea se enfrenta con varios problemas fundamentales en la comprensión del cosmos. Por ejemplo, la formación de los planetas, de las estrellas, de las galaxias y, naturalmente, del universo como un todo, permanecerán entre los objetivos prioritarios durante al menos una buena porción del siglo XXI.

Las observaciones han revelado que los procesos físicos que dominan la formación de planetas, estrellas y galaxias, así como la evolución temprana de todos estos objetos, suceden en un medio material a muy baja temperatura (típicamente entre 10 y 100 K). Este “universo frío” apenas emite radiación óptica, ni de frecuencias más altas (ultravioletas, rayos X, etc), pero sí que emite radiaciones en ondas de radio, preferentemente en los rangos milimétrico y submilimétrico (mm/submm) del espectro. Las estrellas, enormes factorías de elementos pesados, también forman

pequeñas partículas sólidas: los granos de polvo. El polvo se eyecta al medio interestelar al final de la vida de las estrellas y allí, mezclado con gas molecular, actúa como una pantalla que nos impide ver las nuevas estrellas y los planetas que se forman en el seno de esas nubes. De la radiación emitida por los objetos oscurecidos (ya sean protoestrellas, protoplanetas o núcleos de galaxias externas) tan sólo las ondas infrarrojas y de radio son capaces de escapar de la nube que los envuelve.

Por otro lado, la emisión del polvo interestelar tiene lugar en el dominio mm/submm y lo mismo sucede con las moléculas que constituyen el gas de las nubes interestelares. El estudio de estas radiaciones proporciona el único medio de diagnóstico fiable sobre las condiciones físicas (densidad y temperatura) y la composición química del ámbito en que se forman las estrellas. Este mismo tipo de medidas es lo que permite estudiar las nubes de gas y polvo que envuelven los núcleos de las galaxias lejanas.

El continuo mm/submm es una radiación similar a la de un cuerpo negro que tiene su máximo de emisión entre  $100\ \mu\text{m}$  y  $1\ \text{mm}$  y que se origina en el polvo interestelar. Estos fotones forman una radiación relativamente tenue y difusa, pero acaba contribuyendo con una gran densidad de energía tanto al fondo de la Vía Láctea como al del fondo extragaláctico. De hecho, los fotones submilimétricos son los más abundantes del universo.

Las líneas espectrales que se observan en radio se forman tanto en las regiones HII a causa de los fenómenos de recombinación como en el gas molecular de las nubes interestelares y circunestelares. Las transiciones entre los niveles rotacionales más bajos de un gran número de moléculas tienen lugar en el dominio mm/submm, rango en el que hay más de 1000 líneas espectrales conocidas. Este alto número de líneas espectrales, junto con las razones mencionadas antes, hacen del rango mm/submm el más apropiado para el estudio de las nubes interestelares, de sus objetos embebidos y, en resumen, de todo el “universo frío”.

Resulta por tanto que la Radioastronomía tiene para el astrónomo actual un interés estratégico clave, ésta es la banda que permite abordar muchos de los problemas que absorben los esfuerzos de gran número de nuestros investigadores.

## **Radiotelescopios e interferómetros**

### *Requerimientos de resolución y sensibilidad*

Los astrónomos no han descuidado el rango de ondas de radio, pero tecnológicamente las observaciones en este rango de longitudes de onda no son tarea fácil. Los radiotelescopios de antena parabólica han de tener una gran precisión en su superficie, y por lo tanto tienen serias limitaciones en su tamaño. Estos radiotelescopios “de antena única” tienen diámetros típicos entre 10 y 40 metros, lo que equivale a un poder de resolución espacial entre  $30''$  y  $8''$  a  $1\ \text{mm}$  de longitud de onda, mucho menor de

lo que consiguen los telescopios ópticos. Con este poder de resolución, el astrónomo no puede distinguir los detalles que desearía: por ejemplo, ver un disco gaseoso que puede estar formando planetas en torno a una estrella cercana. En las nubes moleculares más cercanas (a unos 140 pc de distancia),  $8''$  equivalen a más de  $1000 \text{ UA}^1$  y no es posible por tanto el distinguir detalles del tamaño de nuestro Sistema Solar. La misma situación se da en la Astrofísica extragaláctica, pues aunque con los instrumentos actuales puede detectarse la radiación emitida por muchas galaxias, no es posible tener una idea mínimamente detallada de sus regiones de formación estelar, o de la estructura de sus regiones nucleares.



Figura 1: El radiotelescopio de 30-m del IRAM en Pico Veleta, cerca de Granada, a 2.800 m de altitud.

Con el fin de superar las dificultades técnicas inherentes a la construcción de grandes antenas de precisión, se construyen interferómetros. El poder de resolución de un interferómetro es el equivalente al de una antena única tan grande como la máxima distancia que separa a las antenas individuales. Por ejemplo, el interferómetro del Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM) en el Plateau de Bure (Alpes franceses) está formado por 6 antenas móviles de 15 m de diámetro. Situando las antenas en diferentes posiciones, que pueden distar hasta unos 500 metros entre sí se obtiene un poder de resolución en torno a  $1''$  (para 1 mm de longitud de onda), lo que significa 140 UA en las nubes de Taurus. Sin embargo, para obtener una buena observación con un interferómetro de un número reducido de antenas es conveniente mover las antenas a posiciones diferentes para intentar obtener un muestreo tan completo como sea posible de las ondas incidentes. Esto supone situar las antenas en una “configuración”, realizar una observación del objeto que nos interesa, mover a otra configuración

---

<sup>1</sup>1 UA  $\simeq$  149,6  $10^6$  km.

y rehacer la observación, y así tantas veces como sea preciso. Combinando estas observaciones se llega a obtener una imagen fiel del objeto que estamos estudiando.

De lo expuesto se pueden deducir rápidamente cuáles son las limitaciones de un interferómetro. Por un lado se trata de un sistema lento de observación y, por otro, está limitado a fuentes relativamente brillantes, aquellas que sean detectables gracias al área colectora total de las antenas individuales. Para paliar estas limitaciones hay que: (i) aumentar el número de antenas tanto como sea posible para mejorar el muestreo, y hacer así que las observaciones sean más rápidas y (ii) construir antenas tan grandes como sea posible para aumentar el área colectora y, por tanto, la sensibilidad.

### *Instrumentación proyectada o en construcción*

Hagamos un rápido repaso de los proyectos de radioastronomía que se encuentran actualmente en fase de construcción o de diseño. En ondas centimétricas se encuentra ya operativo (funcionando para observaciones astronómicas el 50 % de su tiempo) el GBT, Gran Telescopio de Green Bank, EEUU, un radiotelescopio de 100-m de diámetro con apertura sin bloqueado y superficie activa que deberá trabajar hasta unos 3 mm de longitud de onda. El LMT, Gran Telescopio de Ondas Milimétricas, se encuentra en construcción en Sierra Negra, Méjico, a 4600 m de altitud. Se trata de una parábola de 50 m de diámetro que operará entre 3 y 1 mm de longitud de onda y que deberá entrar en funcionamiento hacia 2007. En Atacama, a unos 5000 m de altitud, están entrando en funcionamiento dos radiotelescopios de ondas mm/submm: el japonés ASTE de 10 m de diámetro y el alemán (con participación de Suecia y del ESO) APEX de 12 m de diámetro. El telescopio de 2,5 m denominado SOFIA, que trabajará entre 600  $\mu\text{m}$  y 1 mm de longitud de onda e irá montado en un avión, se pondrá en marcha hacia 2006. El telescopio espacial HERSCHEL, que será lanzado en 2007, es un telescopio simple especializado en ondas submilimétricas (operará entre 60 y 600  $\mu\text{m}$ ) que tendrá muy alta sensibilidad al no sufrir el apantallamiento de la atmósfera terrestre. El telescopio PLANCK, de 1,5 m, será puesto en órbita en la misma fecha con el objetivo prioritario de estudiar el fondo cósmico de microondas.

En lo que se refiere a interferómetros de ondas milimétricas, llevan funcionando más de un década el europeo del IRAM (6 antenas de 15 m), dos estadounidenses – el de Owens Valley (6 antenas de 10,4 m) y el de Hat Creek (9 antenas de 6 m)– y uno japonés (5 antenas de 10 m). En estos momentos no se encuentran operativos los dos interferómetros de EEUU pues, junto con el SZA (8 antenas de 3,5 m), han empezado a ser trasladados a un lugar más elevado para constituir un único interferómetro denominado CARMA. El proyecto estadounidense SMA (8 antenas de 6 m) en construcción en el observatorio de Mauna Kea (Hawaii, EEUU) operará preferentemente en ondas submm.



Figura 2: Panorama del Centro Astronómico de Yebes del OAN (IGN). A la izquierda se distingue el nuevo radiotelescopio de 40 m de diámetro actualmente en construcción. El radomo esférico a la derecha contiene el radiotelescopio de 14 m.

Todos estos desarrollos se verán culminados por la construcción de dos de los telescopios más ambiciosos que haya imaginado el hombre. En ondas mm/submm, el gran interferómetro de Atacama (Atacama Large Millimeter Array) o ALMA: 64 antenas de alta precisión que se ubicarán a 5000 m de altitud, en Atacama (Chile), uno de los desiertos más áridos de nuestro planeta. Y, en ondas cm, el Square Kilometer Array, SKA, un interferómetro con un kilómetro cuadrado de superficie colectora, que se encuentra aún en fase de diseño.

## Recursos nacionales en Radioastronomía

### *Observatorios*

España tiene la capacidad de participar en los proyectos internacionales de desarrollo de instrumentación en Radioastronomía, pero dentro de los límites de los recursos nacionales conviene elegir los proyectos y planear cuidadosamente las aportaciones que realicemos. Uno de los objetivos más importantes en la participación en estos costosos proyectos multinacionales ha de ser la obtención para nuestro país del mayor retorno posible tanto en el plano tecnológico como en el científico.

Los recursos que puede poner España a la disposición de la Radioastronomía son de diversa índole. En primer lugar, conviene subrayar que España cuenta con un recurso natural que es de enorme valor en el contexto europeo: la transparencia de su atmósfera para la observación astronómica. Este factor ha hecho posible la construcción de observatorios astronómicos con muy buenas condiciones para las observaciones en ondas de radio: el observatorio de Izaña (Islas Canarias) por encima de los 2000 m de altitud, el de Sierra Nevada por encima de 2.800 m y el observatorio de Yebes, a casi 1.000 m, los tres protegidos por ley contra la contaminación electromagnética, cuentan con instrumentación radio de gran valía.

En Izaña (Tenerife) se encuentra instalado el denominado “Very Small Array” (VSA), un interferómetro de 14 elementos (bocinas) diseñado para la observación del fondo cósmico de microondas. Este instrumento, fruto de una cooperación británico-española, opera entre 26 y 36 GHz,

proporciona una resolución angular entre 0,2 y 0,5 grados y dispone de dos parábolas para la substracción de fuentes puntuales en los radiomapas.

En Sierra Nevada se encuentra el radiotelescopio de 30 m del IRAM, el instituto hispano-franco-alemán de radioastronomía milimétrica. Este radiotelescopio sigue siendo el mejor del mundo en su género y sus receptores están en transformación permanente para mantener esa posición. En Yebes (Guadalajara), el Observatorio Astronómico Nacional (OAN, Instituto Geográfico Nacional: IGN) dispone del radiotelescopio de 14 m que realizó sus primeras observaciones en 1979 y se encuentra construyendo un nuevo radiotelescopio de 40 m que describiremos a continuación. Finalmente, aunque no fueron concebidas con un fin astronómico, las antenas de la estación de seguimiento de INTA-NASA en Robledo de Chavela han venido utilizándose para observaciones de VLBI.

En este rápido inventario de recursos hemos de destacar los grupos de radioastrónomos e ingenieros que en varias instituciones nacionales (OAN/IGN, CSIC y universidades) vienen por un lado desarrollando una labor investigadora de primera línea y, por otro, utilizando sus laboratorios de antenas y microondas para el diseño y construcción de instrumentación.

### *El gran radiotelescopio de 40-m de Yebes*

El Instituto Geográfico Nacional, a través del Observatorio Astronómico Nacional, es uno de los organismos que fundaron en 1993 el Instituto Conjunto para VLBI en Europa (JIVE). Este instituto es el que realiza la gestión de la Red Europea de VLBI (EVN), red en la que participan 18 radiotelescopios de 14 institutos de varios países europeos, además de Rusia, China y Sudáfrica. Hasta el presente el OAN viene participando en la EVN con su radiotelescopio de 14 m, un telescopio que tiene ya unos 25 años y prestaciones limitadas respecto de los radiotelescopios modernos. La construcción de un nuevo radiotelescopio en Yebes era indispensable para mantener y extender nuestra participación en proyectos de VLBI. Tal proyecto surgía también con el fin de consolidar en nuestro país todos los aspectos experimentales de la radioastronomía con vistas a poder tener una participación tan ventajosa como fuese posible en los grandes proyectos multinacionales que se estaban perfilando y diseñando en los años 90 (en concreto ALMA y SKA).

El radiotelescopio está montado de forma alt-azimutal con cabeza rotante (“turning head”) y posee óptica Nasmyth-Cassegrain con reflector parabólico, subreflector hiperbólico y espejo terciario plano a 45 grados para desplazar el eje óptico lateralmente. El diseño óptico ha permitido situar el foco Nasmyth a más de once metros del vértice de la parábola para disponer de una muy amplia sala de receptores (dimensiones:  $8 \times 9 \times 3,5$  m).



Figura 3: Soporte de la estructura del paraboloide del radiotelescopio de 40 m montado en Yebees a finales de 2003.

El reflector principal está formado por 420 paneles de aluminio distribuidos en 10 anillos concéntricos. La especificación del paraboloide para la precisión de la superficie es de  $150 \mu\text{m}$  (rms), lo que se traduce en una eficiencia de apertura del 70 % y del 50 % para longitudes de onda de 7 y 3 mm, respectivamente. El subreflector posee un movimiento fino para el enfoque y otro más amplio (del orden de un metro) que posibilita la instalación de un receptor en el foco primario. Esta es la configuración que se utilizará para el receptor de holografía en la banda de 12 GHz.

En la cabina, para optimizar el aprovechamiento del espacio, los receptores se organizan en dos ramas independientes. Para las observaciones, se podrá seleccionar una de las dos ramas orientando el espejo terciario Nasmyth hacia uno de los dos espejos fijos denominados M4 y M4'. Con esta disposición se obtienen dos puntos focales independientes situados cada uno de ellos a una distancia de unos 4,5 m de estos espejos M4 y M4'.

El radiotelescopio está equipado con un terminal VLBI de última generación, de los denominados Mark V (ya en Yebees) y deberá ir manteniéndose al día en lo que se refiere a todos los avances tecnológicos que se esperan en VLBI. Por ejemplo: se está planificando la conexión de los radiotelescopios de la EVN mediante líneas de fibra óptica para poder transferir los datos a 1 Gbps, lo que convertirá a la EVN en un interferómetro muy similar a los de tiempo real. Simultáneamente, el VLBI se desarrolla también mediante la utilización de frecuencias de trabajo cada vez más elevadas. En ambos aspectos, el nuevo radiotelescopio de Yebees podrá realizar contribuciones importantes a la red EVN.

Aunque el objetivo principal del radiotelescopio de 40 m es su integración en las redes europea (EVN) y global de VLBI, este radiotelescopio será también de interés para ser utilizado como antena única en muchos proyectos de investigación. En particular, será un instrumento valioso para realizar observaciones de espectroscopía molecular de nubes interestelares galácticas y extragalácticas. Este telescopio deberá complementar al radiotelescopio de 30 m del IRAM en Pico Veleta: si el radiotelescopio del IRAM cubre con preferencia las bandas de 85 a 350 GHz, el de Yebes deberá cubrir aquellas entre 2 y 115 GHz. Ambos telescopios serán operativos en 85-115 GHz, lo que propiciará la realización de observaciones de VLBI en esta importante banda de frecuencias. Pero en contraste a lo que sucede con el radiotelescopio del IRAM (donde los proyectos tienen generalmente una duración de 20-100 horas en tiempos de observación), una gran ventaja del radiotelescopio de 40-m es que posibilitará la realización de proyectos de observación que requieran grandes cantidades de tiempo de telescopio. Este tipo de proyectos puede aportar resultados únicos: estudios sistemáticos de algunos tipos de objetos, monitorización exhaustiva, etc.



Figura 4: Imagen tomada en setiembre del año 2004 del nuevo radiotelescopio de 40 m en Yebes.

Finalmente el nuevo radiotelescopio de Yebes está, desde su diseño y construcción, jugando un papel muy importante en la formación de jóvenes investigadores y, más concretamente, en la formación de astrónomos e ingenieros instrumentistas. En efecto, la posibilidad de participar en el diseño óptico, en la construcción de receptores, en la elaboración del software de control y de análisis de datos de un telescopio de esta envergadura ofrece una oportunidad única para entrenarse en estas tareas

desde primera línea. La experiencia adquirida por nuestros astrónomos e ingenieros en estos proyectos de carácter nacional es la que puede y debe aplicarse a continuación en proyectos multinacionales mucho más ambiciosos (ej. ALMA y SKA) para lograr obtener un óptimo retorno para nuestro país tanto a nivel técnico como científico.

## El proyecto ALMA

El Gran Interferómetro de Ondas Milimétricas de Atacama (Atacama Large Millimeter Array, ALMA) fué descrito en un artículo publicado en el Anuario del Observatorio correspondiente año 2001. Recordaremos aquí las características fundamentales del proyecto, el estado en el que se encuentra la construcción y la participación española en las actividades de desarrollo y construcción del interferómetro.

El consorcio para la construcción de este interferómetro está formado por institutos europeos, estadounidenses y canadienses. Chile, la nación que albergará ALMA, también participa en todas las tareas de planificación. Así se ha diseñado lo que se denomina el proyecto ALMA “básico”. Japón parece haber confirmado ya su participación en el proyecto y deberá contribuir con substanciales mejoras (antenas y bandas de recepción adicionales) al proyecto de base.

El proyecto básico consiste de 64 antenas de 12 metros de diámetro que estarán emplazadas en el Llano de Chajnantor (latitud  $-23^{\circ} 1' S$ , longitud  $67^{\circ} 45' W$ ), a una altitud de 5000 m en el desierto de Atacama (norte de Chile, cerca de la frontera con Argentina). Las especificaciones de las antenas establecen una desviación cuadrática media (rms) de 20 a 25  $\mu m$  para la precisión de las parábolas, una precisión en el apuntado mejor que 0,6" y una velocidad de al menos 1 grado por segundo para quedar posicionadas con un error menor de 3", respecto de la nueva posición solicitada. En la configuración más compacta las antenas estarán agrupadas con una distancia de unos 15 m entre cada dos antenas, mientras que las antenas deberán poder ser separadas entre sí para que el interferómetro logre un efecto de “zoom” (vaya aumentando su poder de resolución), hasta que todas las antenas queden distribuidas en un círculo de unos 14 km de diámetro.

Inicialmente sólo se contemplan 4 bandas de frecuencia, las centradas en torno a 103, 243, 323 y 660 GHz, pero el diseño del sistema óptico (ya completado) tiene en cuenta la posibilidad de que en un futuro se instalen 10 receptores a otras tantas frecuencias. Naturalmente los receptores de ALMA se encuentran en el estado del arte de la ingeniería de microondas y cuentan con la posibilidad de poder discriminar la posible polarización de la radiación recibida.

Tradicionalmente la correlación en un interferómetro se estima formando todas las parejas posibles con sus antenas. En el caso de ALMA ( $N = 64$ )

se disponen de 2016 parejas (o líneas de base) distintas. Y de cada antena se desea procesar una banda muy ancha (con anchura de 16 GHz) para tener una máxima sensibilidad a la radiación continua. Naturalmente la complejidad de un correlador crece con el número de parejas y con la anchura de la banda a procesar. En el caso de ALMA, el correlador tendrá que ser capaz de trabajar a una velocidad en torno al TeraHertzio (THz), es decir deberá realizar en torno al billón de operaciones por segundo.

La primera piedra de la construcción de ALMA se puso en Chajnantor el 4 de Noviembre de 2003 y un año después, en el momento de redactar estas líneas, los trabajos de construcción de las infraestructuras continúan avanzando en Chile. Una nueva carretera de acceso a Chajnantor, que necesita tener una anchura especial de 12 metros para permitir el transporte de las antenas, está siendo construida desde las proximidades de San Pedro de Atacama. Esta carretera unirá el centro de apoyo a las operaciones del interferómetro (Operations Support Facility, OSF), que estará emplazado a 2900 metros de altitud, con el centro de control del interferómetro (Array Operations Site, AOS), que estará emplazado en el propio Chajnantor a 5000 metros. En el emplazamiento del OSF se ha instalado un campamento en el que están basados hoy en día unos 50 trabajadores. Por otra parte, en unas oficinas de un moderno edificio de Santiago se ha instalado provisionalmente el director, Massimo Tarengui, y el resto del personal del Joint ALMA Office.



Figura 5: Uno de los prototipos de antenas de ALMA en que el OAN ha participado en la realización de medidas holográficas de su superficie.

### Participación española en ALMA

El coste total de ALMA se ha estimado en unos 650 millones de euros, a los que nuestro país está contribuyendo con unos 27 millones. La contribución española, que se realiza mediante un acuerdo del ESO con los ministerios de Fomento y de Educación y Ciencia, incluye una parte importante de componentes electrónicos y mecánicos de alta tecnología: amplificadores refrigerables a temperaturas criogénicas, sistemas electrónicos de supervisión y control, sistemas mecánicos de alta precisión para la calibración del instrumento, etc., algunos de ellos diseñados y desarrollados en las instalaciones del OAN, del CSIC y de la ETSIT de la Universidad Politécnica de Madrid.

Radioastrónomos e ingenieros nacionales han participado en el proyecto ALMA desde su misma concepción, tanto con aportaciones científicas (definición de los objetivos científicos y de las necesidades instrumentales requeridas para su logro), como con desarrollos tecnológicos e instrumentales realizados en los laboratorios del OAN/IGN (diseño y construcción de amplificadores HEMT de muy bajo ruido, diseño óptico, holografía) y otras contribuciones técnicas realizadas por el CSIC. Por otra parte, nuestro país tiene la oportunidad de obtener un buen aprovechamiento industrial en campos de muy alta tecnología, mediante la participación de empresas españolas en la fabricación de determinadas partes y componentes del interferómetro. Desde que España se unió al proyecto a finales de los años 90, el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) ha venido promoviendo muy activamente la participación de la industria nacional en ALMA.

En resumen, por primera vez en los tiempos modernos, España está participando, desde sus mismos comienzos, en un proyecto científico de escala global y de extraordinaria importancia tecnológica e industrial; y lo está haciendo con todas las garantías de obtener el mayor aprovechamiento posible de las inversiones realizadas.

### SKA

El proyecto “Square Kilometer Array” (SKA) involucra a astrónomos e ingenieros de unos 40 institutos distribuidos en 15 países. El objetivo es el diseño y construcción de un nuevo radiotelescopio de un millón de metros cuadrados de área colectora, es decir unas 100 veces el área colectora del VLA<sup>2</sup>. SKA trabajará entre 200 MHz y 25 GHz, y los elementos del interferómetro estarán separados por líneas de base que irán de menos de 100 metros a miles de kilómetros. El SKA combinará las técnicas estándar de interferometría con tecnología de *phased-arrays* para llegar a ser el mejor instrumento del mundo en producción de imágenes. En efecto,

---

<sup>2</sup>Interferómetro constituido por 27 antenas de 25 m de diámetro instalado en Socorro, Nuevo Mexico (EEUU).

este interferómetro tendrá un campo de visión muy grande (de al menos un grado cuadrado) y proporcionará una resolución angular del orden de pequeñas fracciones de segundo de arco. En observaciones espectrales, será capaz de cubrir amplios intervalos del espectro con alta resolución.

Sus prestaciones harán del SKA un instrumento único para explorar grandes regiones del cielo en anchos intervalos de desplazamientos al rojo (por ejemplo en la línea de 21 cm de HI, o en la de 3 mm CO desplazada hacia las centimétricas), lo que posibilitará la detección de un gran número de galaxias muy jóvenes y distantes. El estudio de objetos con desplazamientos extremos hacia el rojo es imprescindible para explorar la “edad oscura”, es decir esa época en la evolución del universo en torno a la fase de transición en que ocurrió la formación de las primeras estrellas (y por tanto de los primeros metales) y tuvo lugar la reionización. La observación de las líneas de emisión del HI y del continuo en un gran número de galaxias muestreando todos los rangos posibles de desplazamientos al rojo es lo que permitirá reconstruir la historia de la formación de estrellas y galaxias desde el universo primordial hasta el presente.

En el continuo, el SKA observará la radiación sincrotrón y libre-libre de una amplia variedad de objetos con una resolución y sensibilidad sin precedentes. El medio interestelar de la Vía Láctea, y los procesos de formación estelar que ocurren en su seno, será estudiado con una resolución lineal del orden de la UA. Millones de estrellas maduras, fuentes protoestelares y discos protoplanetarios serán detectados en ondas de radio y podrán ser cartografiados en escalas inferiores a la UA, y hay que tener en cuenta que –contrariamente a lo que sucede en el óptico o en el infrarrojo cercano– estos radiomapas no están afectados por los efectos perniciosos de la extinción del polvo.

El programa de I+D del SKA se prolongará al menos hasta 2008 mediante la exploración detallada de varios conceptos alternativos. Entre las posibilidades que se barajan hoy en día se encuentran las siguientes: a) grandes reflectores esféricos en depresiones del terreno, es decir similares al radiotelescopio de Arecibo, con superficies que cambian su forma de manera dinámica, b) grandes reflectores parabólicos con los receptores situados en un globo aerostático, c) un conjunto formado de un gran número (centenares) de pequeñas antenas parabólicas, d) un conjunto de lentes de Luneburg que son capaces de observar hacia todas las direcciones sin realizar movimientos mecánicos, e) una serie de enormes antenas cilíndrico-parabólicas, y f) una serie de *aperture-plane arrays* con los elementos receptores impresos sobre ellos. Este último concepto que consiste de una serie de placas metálicas planas e inmóviles es una de las soluciones más elegantes, pues permite la observación hacia diferentes regiones del cielo y en diferentes frecuencias (incluso simultáneamente) sin realizar ningún movimiento mecánico. Las técnicas empleadas para

seleccionar la dirección de observación se conocen con el nombre de *beam forming* y están siendo desarrolladas con particular énfasis en Europa. En el momento de redactar estas líneas se ha formado un consorcio a nivel europeo para realizar un estudio de diseño detallado de este concepto. Se construirán unos prototipos denominados EMBRACE, pequeños SKA a escala 1:100, que estarán distribuidos por Europa. El consorcio europeo ha confeccionado un ambicioso proyecto para elaborar este diseño detallado que, incluyendo varios prototipos, ha sido evaluado en unos 25 millones de euros y ha enviado una solicitud para que el Sexto Programa Marco de Unión Europea realice la financiación al 50 %. El restante 50 % sería aportado por los institutos del consorcio, institutos entre los que se encuentra el Observatorio Astronómico Nacional.

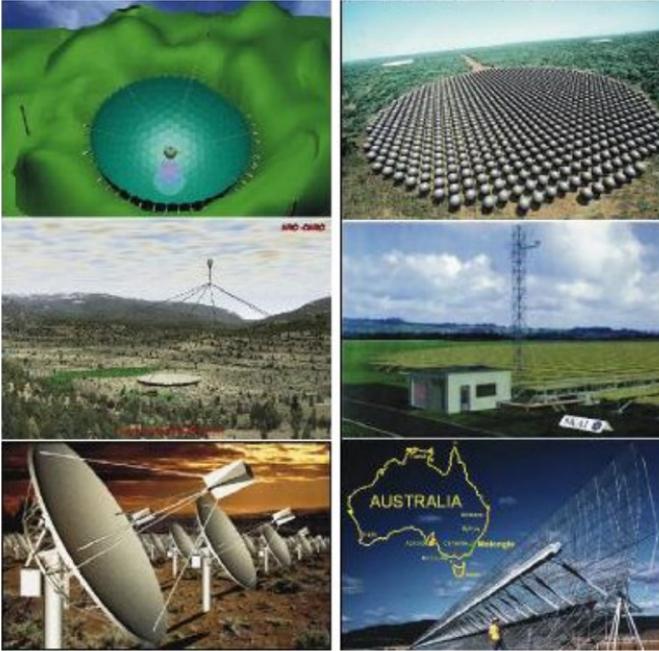


Figura 6: Diferentes conceptos hoy bajo estudio para el SKA. De arriba a abajo y de izquierda a derecha: grandes reflectores esféricos en depresiones del terreno, grandes reflectores parabólicos con los receptores situados en un globo aerostático, un conjunto formado de un gran número (centenares) de pequeñas antenas parabólicas, un conjunto de lentes de Luneburg que son capaces de observar hacia todas las direcciones sin realizar movimientos mecánicos, una serie de “aperture-plane arrays” y una serie de enormes antenas cilíndrico-parabólicas estudiadas en Australia.

La decisión final sobre el concepto definitivamente adoptado para construir el SKA se tomará hacia 2008. La construcción, cuyo coste se estima en unos 1000 millones de euros, se prolongará hasta 2020. Con las prestaciones descritas más arriba, el SKA está llamado a ser el equivalente en ondas centimétricas del ALMA en ondas milimétricas o del telescopio espacial óptico de próxima generación (JWST) en el visible. Sin competidor posible, por ser construido mediante una colaboración a escala global, es de esperar que desde su entrada en funcionamiento el SKA domine completamente la Radioastronomía de ondas centimétricas durante varias décadas.

## Conclusión

La Radioastronomía involucra múltiples tecnologías de punta entre las que se encuentran las técnicas de microondas tan importantes para telecomunicaciones, criogenia, microelectrónica, mecánica de muy alta precisión, etc. El I+D en todas estas tecnologías, que son de gran interés estratégico, es una fuente continua de innovación tecnológica. Esta es una de las razones por las que todos los países desarrollados realizan, de manera mantenida, fuertes inversiones en Radioastronomía. Por otra parte, mantener un sólido programa en Radioastronomía experimental a nivel nacional (por ejemplo, el que se está ejecutando en el OAN) es lo que posibilita la obtención de un óptimo retorno, tanto en el plano tecnológico como el científico, de las inversiones realizadas en grandes proyectos multinacionales (por ejemplo ALMA y SKA).

Pero más allá de las consideraciones de índole aplicada, desde el punto de vista del astrónomo de nuestros días, es muy importante destacar que la Radioastronomía ofrece una visión complementaria, y a veces única, de la que ofrecen las observaciones astronómicas en otros dominios espectrales. Por ejemplo, ALMA y SKA son los equivalentes en los dominios mm/submm y cm, respectivamente, de los grandes telescopios ópticos e infrarrojos que se encuentran en construcción o en desarrollo en el momento actual. En concreto, debido a su poder de resolución comparable, ALMA, SKA, VLT, VLTI y JWST serán instrumentos perfectamente complementarios.

Combinando observaciones en diferentes longitudes de onda con estos instrumentos, la humanidad alcanzará, dentro de tan sólo unos años, la idea más precisa que haya tenido nunca sobre el cosmos. Pero es muy posible que estos instrumentos también abran unos nuevos interrogantes que hoy ni siquiera podemos imaginar.

*Agradecimientos* Este artículo está basado en la contribución realizada a las Jornadas de Astronomía organizadas por el Real Observatorio de San Fernando con motivo de su 250 aniversario celebrado en el año 2003.