

APUNTES SOBRE 30 AÑOS DE RADIOASTRONOMÍA EN ESPAÑA

Jesús Gómez González

*Subdirección General de Astronomía, Geodesia y Geofísica
Instituto Geográfico Nacional - Ministerio de Fomento*

En la noche del 1 a 2 de noviembre de 1979, el ingeniero geógrafo Alberto Barcia (ingeniero de telecomunicaciones) y el astrónomo que escribe estas líneas (físico), realizábamos, en solitario, la primera observación radioastronómica llevada a cabo en nuestro país desde un centro español (el Observatorio de Yebes, en Guadalajara) y con un radiotelescopio (el de 14 metros para ondas milimétricas) que, con excepción de la antena (suministrada por la empresa norteamericana ESSCO) había sido construido, instalado y puesto en funcionamiento únicamente por científicos, ingenieros y técnicos españoles del Instituto Geográfico Nacional (IGN), de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT) de Madrid, y de las empresas participantes en el montaje e instalación de la antena y en la construcción de las infraestructuras necesarias.

Alberto y yo nos ocupábamos de la gestión y coordinación del proyecto (y del propio Observatorio de Yebes), de los trabajos (hardware y software) de control del radiotelescopio (movimiento y toma de datos), y de los trabajos de montaje, ajuste, calibración y puesta a punto de éste para su utilización en observaciones astronómicas. Los profesores y técnicos de la ETSIT de Madrid habían construido el receptor de 90 GHz, no refrigerado, con el que se realizó esa primera observación radioastronómica y los posteriores trabajos de calibración y puesta a punto. Su temperatura de ruido¹ era de unos 7000 K, lo que lo hacía unas 10-12 veces menos sensible que los receptores refrigerados utilizados por aquel entonces en los observatorios con radiotelescopios de ondas milimétricas; es decir, que para alcanzar la misma razón señal/ruido que con éstos, con nuestro radiotelescopio

¹Parámetro que mide la sensibilidad de un receptor.

de 14 metros (en adelante, RT14m) necesitábamos un tiempo de observación (integración) unas 100-150 veces mayor. Y en lo que se refiere a los trabajos de calibración y puesta a punto (puntería, seguimiento, enfoque, eficiencia de apertura,...) para las que resulta necesaria la detección de las radiofuentes en tiempo real, únicamente el Sol, la Luna y, en sus momentos de mayor proximidad, Venus y Júpiter, tenían la intensidad suficiente para ser utilizados como fuentes de calibración. Hay que señalar también que, como más tarde determinaríamos una vez realizados esos trabajos de calibración, la eficiencia de apertura a 90 GHz (3 mm de longitud de onda) del RT14m era de, tan sólo, un 10-12 %.

Estas eran las razones técnicas por las que aquella noche de noviembre de 1979, la fuente que tratábamos de localizar y detectar para hacer una primera corrección de los errores de puntería del telescopio era la Luna. Para ello, cubríamos un área de varios grados cuadrados en torno a las coordenadas celestes de posición de la Luna en cada momento, haciendo barridos en acimut para ángulos de elevación separados unos 10' de arco (el disco de la Luna tiene unos 30' de arco de diámetro).

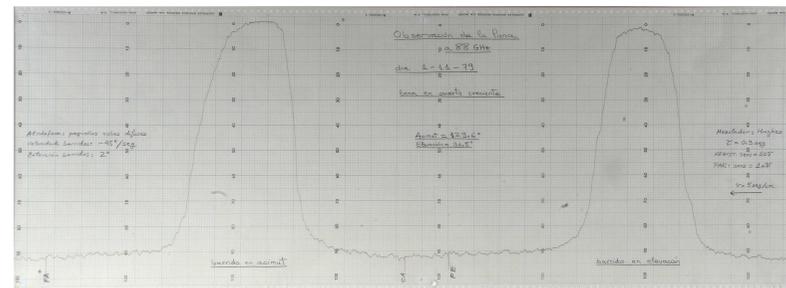


Figura 1: Barridos en acimut y elevación de la Luna a 90 GHz realizados con el radiotelescopio de 14 metros de Yebes por A. Barcia y J. Gómez González, el día 1 de noviembre de 1979.

Durante bastante tiempo (un tiempo largo pero lleno de expectación) no conseguíamos atinar con la dichosa Luna y llegamos a pensar que, tal vez, el sistema tuviera o introdujera un error muy grande de puntería debido a un defecto en la mecánica del radiotelescopio o a un fallo de hardware o de software en el sistema de control. Recuerdo que mientras uno de nosotros movía la antena desde la sala de control, el otro salía al exterior (el RT14m está encerrado dentro de un radomo²) para comprobar que, “grosso modo”, el telescopio apuntaba en la dirección de la Luna. Aquellos momentos, en la soledad -entonces mucho mayor- de los campos de Yebes donde se encuentra el Observatorio, fueron para nosotros algunos de los más

²Estructura esférica de material transparente a las ondas radioeléctricas.

emocionantes que hemos tenido la suerte de vivir (y que sólo se pueden “comprar” con entusiasmo y esfuerzo). Sobre todo cuando, por fin, en uno de esos barridos, la aguja del registrador gráfico de papel comenzó a trazar la señal, ¡espléndida señal!, de la emisión térmica de la Luna a 3 milímetros de longitud de onda (figura 1).

El pasado 3 de abril de 2009, durante la sesión de 100 horas de observaciones astronómicas organizadas a nivel mundial como el acto más significativo del Año Internacional de la Astronomía (que conmemoraba el 400 aniversario de la primera observación con un telescopio realizada por Galileo en 1609), 30 años después de aquella primera observación de la Luna, el nuevo radiotelescopio de 40 metros de diámetro para ondas milimétricas del Observatorio de Yebes realizaba, con éxito, su primera observación de interferometría de muy larga base con los telescopios conectados en tiempo real. En esta técnica observacional, conocida por sus siglas en inglés como e-VLBI, radiotelescopios situados a distancias de miles de kilómetros observan simultáneamente la misma radiofuente enviando, en tiempo real, las señales captadas a los centros de procesado (correlación), a través de redes globales de transmisión de datos de muy alta capacidad. Esta es, sin duda, la técnica observacional más compleja -conceptual, instrumental y organizativamente hablando- de cuantas en la moderna astronomía se llevan a cabo desde emplazamientos en Tierra.

Por otra parte, en la actualidad, el Observatorio de Yebes se ha convertido en uno de los observatorios radioastronómicos más importantes del mundo, en el que una treintena de científicos y técnicos llevan a cabo actividades, no sólo de astronomía, sino también de geodesia y geofísica. Así mismo, el Observatorio de Yebes cuenta con algunos de los mejores laboratorios de electrónica y microondas de Europa en los que se realizan trabajos de I+D+i sobre componentes, equipos e instrumentación utilizados en esas disciplinas, habiéndose convertido, recientemente, en la sede del Centro de Desarrollos Tecnológicos (CDT) de astronomía, geodesia y geofísica del IGN.

Con esa base de conocimientos, experiencia y equipamiento, los radioastrónomos del IGN -científicos y técnicos- participan muy activamente, y desde posiciones muy destacadas, en los más importantes proyectos y organismos internacionales a escala europea y mundial (EVN/JIVE, ALMA, FIRST-Herschel, SKA, VSOP2,...) y han ampliado sus actividades a los campos de aplicación de la radioastronomía en geodesia y geofísica, donde se ha comenzado a proponer, planificar y liderar proyectos de gran envergadura y proyección internacional (proyecto RAEGE).

Las páginas que siguen no son más que unos breves apuntes personales de los “capítulos” más importantes que dan cuenta y razón del recorrido de la radioastronomía en el IGN (o lo que es lo mismo, de la radioastronomía instrumental en España), desde sus inicios, hace más de treinta años, hasta el momento presente. El planteamiento en esos “capítulos” y no en otros

sigue, obviamente, un criterio personal, pero no es un planteamiento arbitrario: hacen referencia a los temas que, como responsable de la radioastronomía del IGN durante todos esos años, han constituido, o sobre lo que han versado mis sucesivas decisiones. Y eso nadie lo sabe mejor que yo.

El Centro Astronómico de Yebes. El radiotelescopio de 14 metros (RT14m)

Durante los primeros años 70, y gracias a los, por entonces en aplicación, Planes de Desarrollo, el Real Observatorio de Madrid (ROM) recibió una importante cantidad de presupuestos de inversión que tenían como objetivo la modernización de sus instalaciones y de sus instrumentos de observación astronómica.

Como principal instalación del Observatorio, se creó el Centro Astronómico de Yebes (CAY), en la provincia de Guadalajara, en una parcela de unos 25 hectáreas, a unos 80 kilómetros al nordeste de Madrid. Como instrumentación para este nuevo centro, los seis astrónomos del ROM que constituían toda su plantilla habían encargado la construcción de un astrógrafo doble de 40 centímetros (a la empresa Carl Zeiss de la República Democrática Alemana); de un telescopio óptico infrarrojo de 1,5 metros de diámetro³ (a la empresa REOSC, de Francia); y, sorprendentemente, de un radiotelescopio de 14 metros de diámetro para longitudes de onda milimétricas (a la empresa ESSCO de Estados Unidos) que incorporaba la más alta tecnología de la época (“estado del arte”) en ese tipo de instrumentos. Y digo que la adquisición de este radiotelescopio resultaba sorprendente porque, en aquel momento, y entre esos seis astrónomos, no había ninguno que tuviera conocimientos científicos ni técnicos en radioastronomía. También se tenía previsto instalar en el CAY, en una torre solar construida al efecto, el telescopio y espectrógrafo de 15 centímetros (de la empresa Zeiss de la República Federal de Alemania) que venía utilizándose en el propio Observatorio de Madrid.

De los seis astrónomos que constituían la plantilla del ROM, uno estaba a punto de jubilarse (su plaza sería la que yo ocupase interinamente en noviembre de 1974); otro era el Director y, prácticamente, dedicaba todo su tiempo a la gestión del observatorio; y un tercero, tenía como tarea la confección de las efemérides astronómicas del Anuario del Observatorio. Así que, cada uno de los otros tres restantes se habría de ocupar de uno de los nuevos instrumentos: telescopio solar, astrógrafo doble y telescopio de 1,5 metros; pero quedaba el radiotelescopio de 14 metros que estaba construyéndose en Estados Unidos.

³Telescopio que, finalmente, y a instancia nuestra, se instalaría en el Centro Astronómico hispano-alemán de Calar Alto (Almería), emplazamiento mucho más adecuado que el de Yebes para ese telescopio.

Esta era la situación del ROM a mediados de 1974 con la que se encontró, al poco de ocupar su puesto, el entonces Director General del IGN, Rodolfo Núñez de las Cuevas, hombre de inagotable entusiasmo y grandes deseos de contribuir a la mejora de nuestro país, cualidades que le llevaron a jugar un importante papel en el desarrollo de la radioastronomía en España.



Figura 2: En la residencia del Observatorio de Yebes (1979). De derecha a izquierda: Rodolfo Núñez de las Cuevas (Director General del IGN); José Pedro Pérez Llorca (Ministro de la Presidencia); José Pensado Iglesias (Director del Observatorio Astronómico Nacional); Jesús Gómez González (Jefe de la Sección de Radioastronomía y del Observatorio de Yebes); Alberto Barcia Cancio (Ingeniero Geógrafo).

En septiembre de ese mismo año, tras unas estancias de 3 años en el Departamento de Radioastronomía del Observatorio de París y de 6 meses en el Observatorio Nacional de Radioastronomía (NRAO) de EEUU, durante las que había realizado mi tesis doctoral, regresé a la Universidad Complutense de Madrid donde tenía reservado un puesto de profesor adjunto en el Departamento de Electromagnetismo de la Facultad de Ciencias Físicas; puesto desde el que iba a impartir un curso de radioastronomía y donde debía comenzar a formar un grupo en esa especialidad en colaboración con el Departamento de Astronomía (la idea era utilizar el radiotelescopio de 64 metros que la NASA estaba construyendo en la Estación Espacial de

Robledo de Chavela, a 60 kilómetros de Madrid). El caso es que el Director del IGN, enterado de mi existencia y de que había realizado una tesis en radioastronomía, me convocó a una reunión en su impresionante despacho del IGN y me ofreció entrar en el Observatorio (inicialmente como astrónomo interino) para hacerme cargo del radiotelescopio que se estaba construyendo en Estados Unidos (el RT14m) y de desarrollar y dirigir las actividades de radioastronomía. Cuando le hablé de mi compromiso con el Departamento de Electromagnetismo, Rodolfo Núñez de las Cuevas me pidió permiso para contactar con su director, Prof. Maximino Rodríguez Vidal y explicarle la situación. Recuerdo que D. Maximino me dijo entonces que lo importante de verdad era que se desarrollase en España la radioastronomía (ciencia que, por entonces, estaba haciendo aportaciones mercedoras de Premio Nobel) y no el lugar o la institución donde se realizara ese desarrollo; así que la propuesta no solo le pareció bien, sino que me animó -“en interés de nuestro país”- a que aceptase la oferta del IGN. De vez en cuando siento nostalgia de aquellos tiempos, entre otras cosas porque había aquellos hombres.

Así fue como, en noviembre de 1974, me vi como Jefe de la Sección de Radioastronomía (que sólo contaba con un astrónomo: yo mismo) y como Director del CAY (del que sólo existía el cercado y la carretera interior, y que todavía no contaba con ningún personal). Eso sí, Rodolfo Núñez de las Cuevas me había prometido que al cabo de un año contaría con 4 titulados superiores. La realidad fue que al cabo de 4 años solo tenía 1 ingeniero (Alberto Barcia), pero yo entonces tenía 26 años y mucha ilusión; y, además, quise crearle.

La particularidad más destacable del diseño del RT14m (figura 3) era la simplicidad de su estructura trasera y su construcción en aluminio. Resultaba de esta forma una estructura muy ligera de la que se esperaba que las deformaciones gravitatorias de su superficie colectora (formada también por paneles de aluminio) fueran muy pequeñas, con lo que se minimizarían las variaciones de su eficiencia al observar a distintos ángulos de elevación. El precio a pagar era que, al no ser su estructura muy rígida, la antena tenía que estar protegida dentro de un radomo, esto es, de una cúpula esférica formada por paneles triangulares de plástico que dejan pasar las ondas radio con una pequeña atenuación, pero que la protegen del viento y de las deformaciones térmicas debidas a la irradiación solar. En realidad, la empresa constructora del radiotelescopio, ESSCO, era una empresa especializada en el diseño y construcción de grandes radomos para antenas de comunicaciones y de radares. Con todo, los costes de fabricación de estas antenas eran muy competitivos y, por aquellos años, centros dedicados a la radioastronomía de Brasil, Finlandia y EEUU (años más tarde, también, de Corea) habían encargado radiotelescopios a ESSCO. Más tarde se vería que el diseño de las estructuras traseras no era suficientemente bueno (por entonces, los modelos y cálculos de elementos

finitos no estaban muy desarrollados) y que, incluso siendo muy ligeras, esas estructuras se deformaban mucho al variar el ángulo de elevación. De hecho, las estructuras de todas ellas, incluida la nuestra, tuvieron que ser reforzadas para su uso a altas frecuencias.



Figura 3: Radiotelescopio de 14 metros de Yebes con el receptor de bandas S/X utilizado en observaciones de VLBI astronómico y geodésico.

Para la construcción del receptor, el IGN había firmado un contrato con el Departamento de Antenas de la ETSIT de Madrid, dirigido entonces por el Prof. Jesús Sánchez Miñana, del que uno de sus jóvenes profesores era Alberto Barcia (sólo unos meses mayor que yo). Se trataba de un receptor a 90 GHz (3 mm de longitud de onda), no refrigerado, que utilizaba como frecuencia intermedia un enorme amplificador máser de 22 GHz. Como antes se ha dicho, la temperatura de ruido de este receptor era de unos 7000 K. Visto ahora, y considerando la bajísima eficiencia de la antena, el altísimo ruido del receptor, las poquísimas radiofuentes que podíamos detectar (todas ellas extensas y, por ello, nada adecuadas para los trabajos de calibración), las limitaciones impuestas por la atmósfera para observaciones a frecuencias tan altas, y la prácticamente nula experiencia que teníamos en el tipo de tareas a realizar, yo mismo me sorprendo de que, después de todo, acabásemos detectando la Luna aquella noche de noviembre de 1979. No digamos ya que acabásemos determinando los errores de puntería y de seguimiento, de que ajustásemos el foco, estimásemos la eficiencia de la antena a 90 GHz y de que incluso llegásemos a realizar una observación espectral detectando la emisión a esas frecuencias de un máser circunestelar de la molécula de SiO. Hay que decir que esto nos llevó varios años y que la conclusión final fue que el RT14m no tenía capacidad efectiva

(no era competitivo) para trabajar a longitudes de onda de 3 mm (incluso después de haber hecho modificaciones para hacer más rígida la estructura de la antena siguiendo un diseño de ingenieros de la ETSI Aeronáuticos de Madrid). Así que se tomó la decisión de construir un receptor refrigerado a 45 GHz (7 mm de longitud de onda) con el que realizar observaciones de moléculas interestelares y circunestelares en ese rango de frecuencias (en particular, de la emisión máser de SiO en las envolturas circunestelares). Esta decisión se apoyaba en dos hechos: primero que durante esos años habíamos seleccionado a jóvenes físicos e ingenieros de telecomunicación entre los más destacados de sus promociones (varios de ellos premios extraordinarios de licenciatura) que, tras un periodo inicial de formación con el RT14m, enviábamos a Francia, Alemania y Estados Unidos para realizar sus tesis doctorales en la física de los medios interestelar y circunestelar y en la instrumentación radioastronómica a longitudes de onda milimétricas; y segundo que, como relataré mas adelante, en mayo de 1980 el IGN había firmado con el Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) de Francia, y la Max-Planck Gesellschaft (MPG) de Alemania, un Convenio de Colaboración para la instalación y funcionamiento del recién constituido Instituto franco-alemán de Radioastronomía Milimétrica (IRAM). En este convenio se establecía que, en compensación de sus aportaciones, el IGN tendría derecho al uso de un 10 % del tiempo de observación con los radiotelescopios a construir y operar por el IRAM: el radiotelescopio de 30 metros de Pico de Veleta, y el interferómetro de 3 antenas (actualmente, 6 antenas) del Plateau de Bure, que eran y, hasta el momento presente continúan siendo los mejores radiotelescopios del mundo a longitudes de onda de hasta 1,2 mm (270 GHz). Así que teníamos gente formada en la astrofísica molecular y acceso a tiempo de observación con los mejores radiotelescopios del mundo a muy altas frecuencias.

El diseño y construcción del nuevo receptor a 45 GHz se realizó por completo en los laboratorios y talleres del CAY, siendo el primer receptor refrigerado a temperaturas criogénicas (~ 15 K) a tan altas frecuencias que se construía en nuestro país. El receptor se instaló en el RT14m en el año 1988⁴. Por entonces la plantilla de los radioastrónomos del CAY contaba con 8 titulados superiores.

La principal ventaja que podría tener el uso del RT14m era la gran cantidad de tiempo de observación de que disponíamos. Así que resultaba un instrumento adecuado para la realización de lo que se conoce como proyectos de observatorio, que son aquellos que requieren de grandes cantidades de tiempo de observación por el tamaño angular, número o duración de la variación temporal de los objetos astronómicos que se quieren estudiar. En nuestro caso, las observaciones de proyectos, llamémoslos normales (que requieren unas pocas horas o días de observación), se hacían con los radiotelescopios del IRAM (mucho más potentes y versátiles que el RT14m).

⁴Un primer receptor a 45 GHz, no refrigerado, se había construido en 1982.

Así que, aunque también se realizaron algunas de éstas con el RT14m a 45 GHz, el principal proyecto que se llevó a cabo con este radiotelescopio fue el seguimiento de las variaciones de intensidad de la emisión de los máseres circunestelares de SiO en estrellas evolucionadas, con vistas a establecer su posible correlación con la variación de su emisión en el infrarrojo (IR). Nuestras observaciones establecieron una clara correlación de las emisiones en el máser de SiO de la envoltura circunestelar y de la emisión IR de la estrella, resultado y datos observacionales que, como vamos a ver más adelante, nos llevarían a poder realizar una importante aportación científica: la primera detección utilizando las técnicas de la VLBI de los máseres circunestelares de SiO (figura 4); detección que ha abierto un nuevo campo de estudios de astrometría de estos objetos y con ello, de estudios de cinemática y evolución de las envolturas circunestelares, por lo que ha sido considerado un hito en el estudio de los mismos.

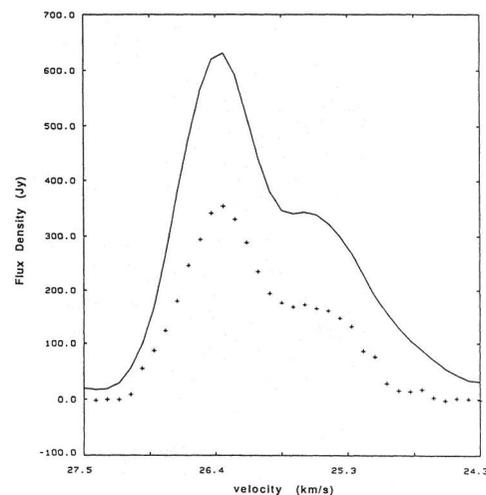


Figura 4: Primera detección de un máser circunestelar de la molécula de SiO utilizando las técnicas de la VLBI: Espectro de la emisión en la envoltura de la estrella μ Cep obtenido, en 1989, por las técnicas de la VLBI con los radiotelescopios de Yebes, Effelsberg (Alemania) y Onsala (Suecia). La línea continua muestra la emisión total, mientras que la discontinua muestra la emisión detectada con la línea de base (Effelsberg-Onsala) de 800 km.

En las técnicas radioastronómicas de la VLBI más usuales, las señales captadas por cada radiotelescopio se registran en cintas o discos magnéticos de gran capacidad. Posteriormente, estas cintas o discos son enviados al centro de procesamiento donde se correlacionan simulando, en tiempo diferido,

lo que en un interferómetro conectado se realiza en tiempo real. El resultado es doble: por una parte se obtienen las radioimágenes del objeto observado con una resolución angular de décimas o centésimas de milisegundo de arco, lo que resulta inalcanzable por cualquier otra técnica de observación astronómica; por otra parte, se determinan las distancias entre los radiotelescopios (que, como se ha dicho, pueden ser de miles de kilómetros) con una precisión del orden de 1 cm, y las orientaciones de las líneas de base con respecto al marco de referencia celeste, con las precisiones correspondientes ($\sim 1\text{cm}/10^4\text{ km} =$ décimas de milisegundo de arco). Este doble tipo de resultado hace que la VLBI se aplique tanto en estudios de interés astronómico, como de interés geodésico/geofísico.

El primer experimento de observación de VLBI se llevó a cabo, en 1967, entre antenas de Estados Unidos y Canadá. Con motivo del vigésimo aniversario de ese crucial experimento, en 1987 se celebró, en la Universidad de Harvard (EEUU), un congreso dedicado al desarrollo y resultados obtenidos por las técnicas de la VLBI. Asistí a ese congreso con la idea de analizar las posibilidades de instalación y puesta en marcha de esas técnicas en el RT14m. Allí me encontré con Alain Baudry, experto en VLBI y director del Departamento de Radioastronomía del Observatorio de Burdeos, a quién conocía desde mis tiempos de estancia en el Observatorio de París. Alain me presentó a Claude Boucher, director del Departamento de Geodesia Espacial del IGN de Francia, quien estaba interesado por el desarrollo de la VLBI geodésica en su instituto. Y juntos decidimos cooperar en VLBI utilizando el RT14m. En el CAY, los ingenieros diseñaron y construyeron un receptor refrigerado para observación simultánea en las bandas S y X (S/X), que podía usarse tanto para observaciones de interés astronómico, como geodésico; se diseñó un nuevo subreflector en fibra de vidrio que se ajustaba a la focalización del nuevo receptor (la construcción la realizó la ETSIT de Madrid). El Observatorio de Burdeos aportó el máser de hidrógeno y el sistema de registro y almacenamiento de datos, del tipo MarkII, para observaciones VLBI. Estos sistemas MarkII (que utilizaban en paralelo varios registradores de video) ya habían quedado muy sobrepasados técnicamente (en el Observatorio de Haystack, del MIT, se había desarrollado el sistema Mark III). Pero nuestro objetivo inicial era evidenciar, fehacientemente, nuestra capacidad técnica para la instalación y puesta en funcionamiento de la instrumentación necesaria para la realización de observaciones de VLBI, al tiempo que iniciábamos el proceso de formación de jóvenes astrónomos en los trabajos de análisis e interpretación de los datos adquiridos por esas técnicas. Cuando estos objetivos se hubieron logrado, pasamos a dotar al RT14m con nuestro propio máser de hidrógeno y un moderno sistema Mark III de tipo VLBA, y a integrar a Yebes en las redes europea y mundial de VLBI astronómico y geodésico.

Hacia 1995, el sistema para observaciones de VLBI con el RT14m en las bandas de frecuencia S/X estaba instalado y operativo, realizándose con

éxito las primeras observaciones. En España, ya éramos capaces de hacer, con nuestra propia instrumentación, las observaciones radioastronómicas basadas en Tierra más complejas de aquellos tiempos.

Por otra parte, jóvenes astrónomos del Observatorio habían realizado estancias de varios años en los mejores centros del mundo donde se trabajaba en VLBI (Universidad de Chalmers, en Suecia; Universidad de Harvard, en EEUU; Instituto Max-Planck de Radioastronomía de Bonn, en Alemania). Pero aunque las técnicas de observación fueran otras (VLBI), no se producía dispersión científica ya que el campo de estudio en el que se había enviado a formar a estos jóvenes era el mismo que el del resto de los astrónomos del observatorio: los medios interestelar y circunestelar a través de su componente en forma de gas molecular.

Podría, pues, decirse que, hacía 1995, en el IGN se abrió un nuevo campo de actividad en radioastronomía, la VLBI, que, a través de sus aplicaciones en geodesia, la conectaba directamente con alguna de las actividades más tradicionales del Instituto.

Volvamos ahora a la primera detección de los máseres circunestelares de SiO por las técnicas de la VLBI. Estas fuentes, de emisión muy intensa (en inglés, máser quiere decir amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación) provienen de regiones tan pequeñas que sólo pueden distinguirse y localizarse (resolverse) dentro de la envoltura circunestelar con resoluciones angulares que sólo es posible alcanzar con las técnicas de la VLBI (resoluciones de una décima o centésima de milisegundo de arco). Además de para conocer su naturaleza y los procesos físicos que en ellos tienen lugar, el interés de la detección por VLBI de los máseres circunestelares reside en que, observándolos en distintas épocas, se puede determinar su desplazamiento espacial y así conocer la cinemática (expansión) de la envoltura y, a partir de ello, su distancia y su evolución. Por estas razones esa detección había sido intentada sin éxito en anteriores ocasiones por otros radioastrónomos. La ventaja que nosotros teníamos era que, gracias al proyecto de observatorio que nos había conducido a establecer la correlación de la intensidad de la emisión máser de SiO con la emisión IR de la estrella, nosotros podíamos predecir fácilmente (viendo las curvas de variación de la emisión IR) los momentos en los que la emisión de SiO sería más intensa. Así que en el momento de planificar la observación (lo que en VLBI ha de hacerse con semanas o meses de antelación) podíamos conocer cuales de esas envolturas circunestelares serían las que tendrían una emisión de SiO más intensa en el momento de la observación. Las observaciones se realizaron en el invierno de 1989, observando a 43 GHz con los radiotelescopios de Yebes, de Onsala (Suecia) y de Effelsberg (Alemania). Y, por primera vez, la emisión del máser de SiO a esas frecuencias (transición $J=1-0$, $v=1$) en la envoltura circunestelar de la estrella μ Cep, fue detectada (figura 4), abriendo así, como ya se ha dicho, un nuevo campo de estudios radioastronómicos que ha producido

un gran número de trabajos científicos de extraordinaria importancia en el conocimiento de la naturaleza y evolución de ese tipo de objetos.



Figura 5: Edificio de despachos y laboratorios de Yebes: a) Vista exterior desde el RT40m b) Laboratorio de amplificadores.

Esta ha sido, sin duda, la principal aportación científica producida como consecuencia de la instalación y puesta en funcionamiento del RT14m. Pero a nivel de nuestro país, la contribución del RT14m a su desarrollo cientí-

fico ha sido mucho más amplia, puesto que fue el instrumento que catalizó la creación en España del primer grupo de radioastronomía experimental; grupo que, en la actualidad (y como veremos más adelante) domina todos los aspectos instrumentales que forman parte de esta técnica observacional, desde los procesos de captación de las ondas electromagnéticas y su transformación en señales eléctricas (grandes áreas colectoras con sus servomecanismos de control, sistemas cuasiópticos, lentes y antenas focales,...), hasta los procesos de digitalización, registro y almacenamiento de los datos, tanto en el continuo, como espectrales (convertidores A/D, bancos de filtros, espectrómetros, bandas y discos magnéticos,...), pasando por todos los procesos de amplificación, mezcla de frecuencias y detección que experimenta la señal en las distintas etapas de radiofrecuencia y frecuencia intermedia de los receptores tecnológicamente más avanzados. Puede decirse que, durante estos últimos 30 años, el IGN, a través del Observatorio Astronómico Nacional, y muy en particular del Observatorio de Yebes, ha desarrollado una nueva técnica observacional en España, la radioastronomía, que aplica y utiliza para la realización de estudios astronómicos y geodésicos. Y este logro tiene su origen en la instalación, puesta en marcha y primeros usos del RT14m.

Desde mediados de los años 90, los desarrollos de la radioastronomía en el IGN siguen dos líneas principales de actuación: las observaciones de interés puramente astronómico mediante el uso de radiotelescopios de antena única y de interferómetros conectados en tiempo real; y las observaciones de interés tanto astronómico, como geodésico, mediante la utilización de las técnicas de la VLBI. Los dos apartados siguientes están en directa relación con esas dos líneas de actuación.

El Instituto hispano-franco-alemán de Radioastronomía Milimétrica, IRAM

Durante los últimos años 60 y primeros 70 del pasado siglo, los radioastrónomos franceses del Observatorio de París-Meudón y los alemanes del Instituto Max-Planck de Radioastronomía de Bonn, se encontraban planificando los desarrollos a seguir en cada una de sus instituciones con vistas a la extensión de sus actividades a las, por entonces tecnológicamente incipientes, longitudes de onda milimétricas. Los franceses centraban sus esfuerzos en la construcción de un interferómetro a esas frecuencias, probablemente porque en ese tipo de instrumentos acumulaban una buena experiencia (habían construido interferómetros solares y de dos antenas móviles, en la Estación Radioastronómica de Nançay). Por su parte, los astrónomos alemanes trataban de desarrollar un radiotelescopio milimétrico de gran área colectora (30 metros de diámetro), en este caso, tal vez, por el avance tecnológico en ese campo que había representado su radiotelescopio de 100 metros de diámetro para ondas centimétricas (finali-

zado en los primeros años 70) que, aún en la actualidad, casi cuarenta años después, continúa siendo, junto con el recientemente construido (2001) en Green Bank, EEUU, el radiotelescopio completamente móvil más grande del mundo. Los esfuerzos por parte francesa los lideraba el entonces director del Departamento de Radioastronomía del Observatorio de París Meudón, Emile-Jacques Blum; por parte alemana era el director del Instituto Max-Planck de Radioastronomía de Bonn, Peter Mezger, quién lideraba el proyecto. Ambos contaban con espléndidos equipos de colaboradores, tanto científicos, como técnicos. La génesis del IRAM como instituto franco-alemán siguió muchas vicisitudes que yo no podría contar y que, desde luego, quedan completamente fuera de lo que pretenden estos apuntes. El caso es que el 3 de abril de 1979, el CNRS francés y la MPG alemana firmaron el acuerdo por el que, en noviembre de ese mismo año, se creaba el IRAM. En ese acuerdo se establecía que el IRAM tendría su sede central en el campus de la Universidad de Grenoble, y que contaría con dos estaciones de observación: la de Pico de Veleta, en Granada, donde había de instalarse el radiotelescopio de 30 metros; y la del Plateau de Bure, en los Alpes franceses, a unos 80 kilómetros al norte de Grenoble, donde se instalaría un interferómetro milimétrico de 3 antenas de 15 metros. Ambos instrumentos deberían ser capaces de trabajar a 1,8 mm (170 GHz) de longitud de onda.

Unos pocos meses después de la creación del IRAM, tan pronto como en mayo de 1980, se firmaba, en Granada, el acuerdo de colaboración entre el IGN y el IRAM. Según este acuerdo, el IGN contribuiría con los terrenos en Loma de Dilar (Pico de Veleta) donde habría de instalarse el radiotelescopio de 30 metros, así como con los locales (inicialmente, 600 m², que más tarde se ampliaron a 800 m²) donde se instalarían las oficinas y laboratorios de la sede del IRAM en Granada capital. Como contrapartida a estas aportaciones, el IGN tendría derecho a un 10% del tiempo de observación con cada uno de los instrumentos del IRAM (radiotelescopio de 30 metros e interferómetro del Plateau de Bure). Así mismo, el IGN tendría derecho a nombrar al codirector de la Estación de Granada-Pico Veleta y podría asistir, como observador, a las reuniones del Comité Ejecutivo de IRAM (su máximo órgano directivo).

En ese acuerdo IGN-IRAM de 1980 se establecía también que el IGN podría negociar más tarde su participación en IRAM como miembro de pleno derecho, lo que por nuestra parte era lo que se pensaba hacer una vez que la radioastronomía en el IGN hubiese alcanzado el debido grado de desarrollo. Y así fue que, en 1990, el IGN negoció su participación en el IRAM como miembro de pleno derecho, con una contribución financiera del 6%. De este modo, su derecho a tiempo de observación con cada uno de los instrumentos pasó a ser del 16%, y su participación en todos los órganos y comités directivos y científico-técnicos del IRAM se hizo paritaria a la de los otros dos asociados, CNRS y MPG. Hay que señalar aquí que,

en 1996, una contribución especial del IGN de un tercio de los costes de construcción de una cuarta antena para el interferómetro del Plateau de Bure, abrió la puerta al proceso que, finalmente, llevaría a ese instrumento a estar compuesto por 6 antenas y a alcanzar sus actuales capacidades técnicas, que duplican el área colectora del proyecto original y multiplican por un factor 5 su rapidez en la obtención de imágenes. Más adelante, en otro apartado, hablaré de los actuales proyectos de desarrollo de ese instrumento (proyecto NOEMA), en el contexto de la nueva era que está abriéndose a escala global en el campo de la radioastronomía milimétrica.

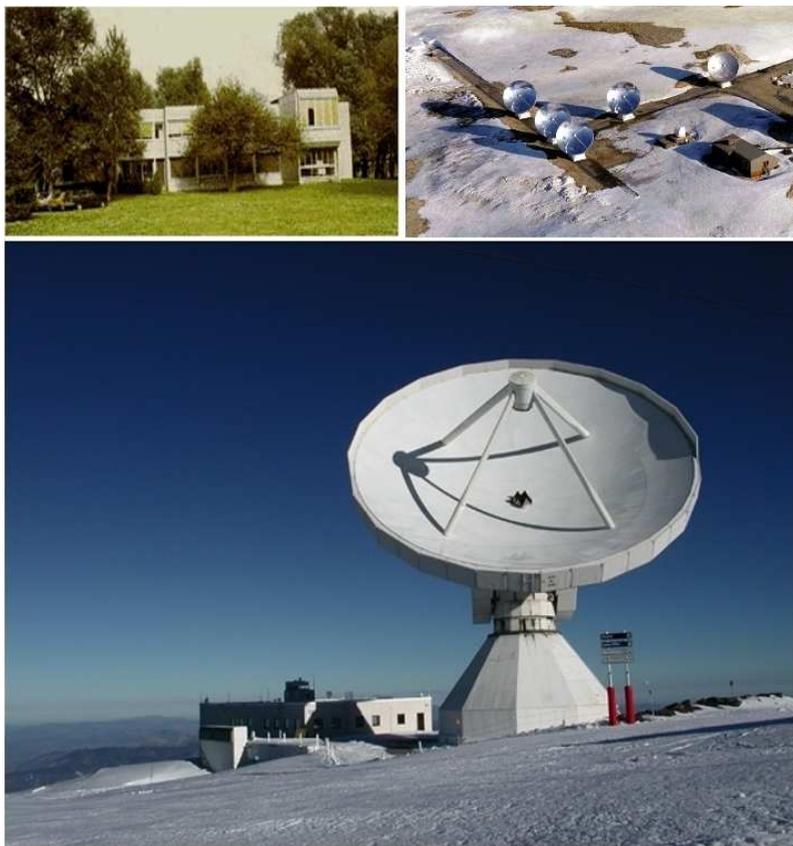


Figura 6: Instituto hispano-franco-alemán de Radioastronomía Milimétrica (IRAM): a) Sede central de Grenoble; c) Interferómetro de 6 antenas de 15 metros del Plateau de Bure; b) radiotelescopio de 30 metros de Pico de Veleta.

He dicho más arriba que, formalmente, la colaboración del IGN en el IRAM dio comienzo en 1980. Pero lo cierto es que, a mi través, la relación de la radioastronomía del IGN con el IRAM se remonta a bastantes años antes.

Mi estancia en el Departamento de Radioastronomía del Observatorio de París-Meudón para hacer mi tesis doctoral se prolongó durante los años 1971 a 1974, justo cuando, como ya he dicho, los proyectos francés y alemán de radiotelescopios para ondas milimétricas iban convergiendo en lo que, finalmente, acabaría siendo el IRAM. Blum era entonces el director de ese Departamento y, ya en aquellos momentos, me pidió que consiguiera mapas de la región de Sierra Nevada para tratar de localizar en ellos posibles emplazamientos para el interferómetro que estaban proyectando (el radiotelescopio de 30 metros siempre podría instalarse en ese mismo emplazamiento ya que, para ello, no necesitaba un área muy grande). Esta búsqueda de emplazamientos continuó más tarde, en 1976, durante un viaje por carretera desde el Observatorio hispano-alemán de Calar Alto (que acababa de ser inaugurado por el rey Juan Carlos) hasta Granada, que hicimos Blum y yo para realizar una inspección visual de posibles emplazamientos (ninguno de los cuales acabó siendo adecuado para la instalación del interferómetro).

En 1977, Blum, acompañado por el joven radioastrónomo francés Pierre Encrenaz⁵ -con el que yo había colaborado durante la realización de mi tesis doctoral-, mantuvieron un primer contacto formal en el IGN en Madrid con vistas a nuestra colaboración con el IRAM; y algunos meses más tarde, Rodolfo Núñez de las Cuevas y yo mismo mantuvimos en París una reunión con el Secretario General del CNRS, Pierre Creysel, en la que se fijaron las condiciones de esa colaboración, y que fueron las que, finalmente, quedaron establecidas en el acuerdo IRAM-IGN firmado en 1980.

En 1982, el radioastrónomo francés Michel Guélin, que había sido mi codirector de tesis en el Observatorio de París-Meudón -y desde entonces y hasta ahora, mi maestro y amigo- había sido nombrado director de la Estación de IRAM de Granada-Pico Veleta. Michel me animó a que me fuese con él a Granada como codirector español de la Estación, lo que así hice en septiembre de 1983. Por entonces, el radiotelescopio de 30 metros y su edificio anejo para sala de control, oficinas, laboratorios y talleres y residencia del personal, estaban en construcción. Los locales en Granada capital, también estaban equipándose y poniéndose en funcionamiento. A nuestro cargo teníamos un grupo muy entusiasta de jóvenes astrónomos, ingenieros, y técnicos de Alemania, Francia y España quienes, durante los siguientes años, hicieron un trabajo muy duro y, en ocasiones, arriesgado (las subidas en invierno a Pico de Veleta resultaban, a veces, bastante peligrosas), para instalar, calibrar y poner en funcionamiento operativo el ra-

⁵ Actualmente P. Encrenaz es miembro de la Academia Francesa de Ciencias.

diotelescopio de 30 metros y el resto de las instalaciones. El radiotelescopio comenzó sus operaciones regulares en el verano de 1986. En septiembre de ese mismo año, yo regresé a Yebes donde retomé mis funciones de director y envié a Granada al astrónomo Jesús Martín-Pintado, como codirector de la Estación. El 14 de septiembre de 1987, la Estación Radioastronómica IRAM-IGN de Pico de Veleta fue inaugurada por el entonces Ministro de Obras Públicas y Urbanismo⁶, Javier Sáenz de Cosculluela.



Figura 7: Llegada en invierno (1985) al radiotelescopio de Pico Veleta. Derecha: Jesús Gómez González. Centro: el astrónomo Pere Planesas.

Como he mencionado en el apartado anterior, mi política de personal desde que fui nombrado responsable de la radioastronomía del IGN, había consistido en seleccionar a los físicos e ingenieros de telecomunicación más brillantes de sus promociones y, tras un periodo de formación inicial y prueba en Yebes, enviarlos con una beca a realizar su tesis doctoral en los mejores centros de radioastronomía de Francia, Alemania y EEUU. La verdad es que este proceso funcionó muy bien en todos sus aspectos, y que, como hemos dicho, a finales de los años 80, el grupo de radioastronomía del IGN contaba con una plantilla todavía pequeña (8 titulados superiores), pero muy selecta y con una excelente formación tanto científica como técnica en el campo de las ondas milimétricas. En mi opinión, era el momento de participar en el IRAM como miembros del pleno derecho, y así se lo propuse al entonces Director General del IGN, Ángel Arévalo Barroso. La idea fue muy bien acogida y, en 1990, el IGN se convirtió en

⁶Ya entonces, el IGN estaba adscrito a ese ministerio, actualmente Ministerio de Fomento.

el tercer asociado del IRAM, en unas condiciones que se han demostrado inmejorables.



Figura 8: En las dependencias del Plateau de Bure (invierno de 1988). De derecha a izquierda: Ángel Arévalo Barroso (Director General del IGN); Javier Saenz de Cosculluela (Ministro de Obras Públicas y Urbanismo); Jesús Gómez González (Director del Observatorio Astronómico Nacional); Michael Grewing (Director del IRAM).

Con nuestro ingreso en el IRAM, y con el inicio del funcionamiento operativo del radiotelescopio de 30 metros y, más tarde, del interferómetro del Plateau de Bure (hacia 1988), comenzó para la radioastronomía española en ondas milimétricas y, muy especialmente, para la del IGN, una nueva etapa de desarrollo que nos ha llevado a ocupar, en la actualidad, un puesto de vanguardia a nivel mundial. Esto es así, y de ello dan fe los logros que se han alcanzado, y los proyectos mundiales más avanzados (tanto basados en Tierra, como espaciales) en los que participan nuestros astrónomos y nuestros ingenieros y técnicos. En septiembre del pasado año 2009, se conmemoró en la sede central del IRAM, en Grenoble, el 30 aniversario de su fundación. Me correspondió decir unas palabras en nombre del socio IGN; y al final de mi intervención (si bien en inglés) dije lo siguiente:

“Personalmente, he tenido el privilegio de asistir a casi todas las reuniones del Comité Ejecutivo del IRAM; primero como observador, con voz pero sin voto, y luego, a partir de 1990, como miembro de pleno derecho. A lo largo de tanto tiempo, y desde ese puesto privilegiado, he podido contemplar el magnífico desarrollo del IRAM que ha convertido a ese instituto nuestro -porque siempre lo hemos sentido y lo sentimos como

nuestro- en el instituto de referencia de la radioastronomía milimétrica mundial, tanto por sus aportaciones científicas, como por sus desarrollos tecnológicos e instrumentales, de los que se nos dará buena muestra en los días que siguen.

En el seno del Comité Ejecutivo, he sido testigo y participe de momentos de debate y desacuerdo, pero creo que transcurridos 30 años -más exactamente, los primeros 30 años- debo decir que la colaboración CNRS/MPG/IGN puede considerarse, simplemente, como ejemplar. Así lo demuestran los hechos acaecidos y los logros alcanzados. Y así lo he sentido siempre, y así lo he proclamado siempre dentro y fuera de mi país”.

Todos los presentes en el acto estuvieron de acuerdo con mis palabras.

El desarrollo de la VLBI: la entrada en la EVN y la fundación del JIVE

Más arriba, en el apartado dedicado al CAY y al RT14m, he contado, de forma muy breve, los primeros pasos y decisiones que condujeron al inicio de las actividades de VLBI astronómica y geodésica en nuestro Observatorio. Referiré ahora, también muy brevemente, la forma en que ese campo de actividad se fue consolidando y desarrollando hasta convertirse en la que actualmente es la línea de actuación más importante del IGN en materia de astronomía y de geodesia.

Tan pronto como en 1968, apenas un año después del primer experimento de VLBI realizado entre USA y Canadá, ya se realizaron experimentos de VLBI entre radiotelescopios europeos (Onsala (Suecia), Jodrell Bank (UK), Simeiz (Rusia),...) y radiotelescopios situados al otro lado del Atlántico (Green Bank (EEUU), Algonquin (Canadá), Haystack (EEUU),...). Según mi conocimiento, el primer experimento de VLBI entre radiotelescopios europeos (Jodrell Bank, Onsala, Dwingeloo (Holanda) y Effelsberg (Alemania)), y procesado en un correlador europeo (el correlador de datos Mark III del Instituto Max-Planck de Radioastronomía de Bonn), se realizó a comienzos de 1978. Y fue en 1980 cuando, a fin de realizar este tipo de observaciones, los cinco institutos de radioastronomía más importantes de Europa (Observatorio de Jodrell Bank, Instituto Max-Planck de Radioastronomía de Bonn, Fundación para la Radioastronomía de Holanda (ASTRON), Observatorio Espacial de Onsala e Instituto de Radioastronomía de Bolonia), junto con el Departamento de Geodesia de la Universidad de Bonn, fundaron la Red Europea de VLBI (conocida por sus siglas en inglés como EVN, European VLBI Network).

A finales de los años 80, el director del Instituto Max-Planck de Radioastronomía de Bonn que, entre otras cosas, se encargaba de las observaciones de VLBI, era Richard Wielebinski. Conocía a Richard porque ambos habíamos trabajado y teníamos interés en las observaciones y estudios de

los púlsares⁷ (tema sobre el que yo había realizado mi tesis doctoral) y fue él quien, conociendo que estaba tratando de iniciar la VLBI en Yebe, me invitó a participar en la reunión del Consejo de Directores de la EVN que, en 1990, se celebraba en Jodrell Bank, cerca de Manchester. Desde entonces continué asistiendo a las reuniones de ese Consejo, primero como invitado, más tarde como director de una institución asociada de la EVN y, por último, desde 1993, como director de una de las instituciones de la EVN.

Durante aquellos primeros años, nuestra participación en la EVN se realizaba a través de observaciones puntuales con el RT14m. Pero, en 1992, el entonces director general del IGN, Ángel Arévalo, me animó a iniciar el proceso de construcción de un nuevo radiotelescopio que sustituyese al RT14m (que ya había dejado de ser competitivo); nuevo radiotelescopio con el que se desarrollaran las técnicas de la VLBI en todos los campos de interés para nuestro instituto (astronomía, geodesia y geofísica). Ese nuevo radiotelescopio es el actual Radiotelescopio de 40 metros de Yebe (RT40m) del que hablaré mas adelante.

En razón del proyecto de RT40m, nuestra participación en la EVN siempre fue importante, aunque nuestra contribución a las observaciones todavía no lo fuera; pero participábamos en todos los comités de la EVN (de directores, científico-técnico, de programas) y, en definitiva, estábamos realizando la construcción de un radiotelescopio que habría de ser (y así ha sido) uno de los más importantes de la Red (a altas frecuencias, el más importante). Es decir, estábamos trabajando en el desarrollo instrumental de la EVN, a un nivel muy significativo y, con nuestra participación en los distintos comités y grupos de trabajo, estábamos contribuyendo a su funcionamiento operativo.

Durante aquellos años las directrices que marcaron mis decisiones para la creación de un grupo de radioastrónomos (científicos y técnicos) dedicados a la VLBI, fueron las mismas que había seguido en la formación del grupo dedicado a la radioastronomía milimétrica, si bien, en el caso de la VLBI, el punto de partida era mejor en cuanto a personal y experiencia. El hecho es que encontré becas y modos para enviar a formarse durante largos periodos (1 a 4 años) en las técnicas y en los campos de estudio donde se utiliza la VLBI, en los mejores centros del mundo, a astrónomos del IGN (Pablo de Vicente, al Instituto Max-Planck de Radioastronomía, Bonn; Javier Alcolea, al Center for Astrophysics de Harvard, USA; Pere Planesas, al California Institute of Technology, USA); a becarios previamente seleccionados y formados en Yebe (Francisco Colomer, al Observatorio de Onsala y al Center for Astrophysics de Harvard; Rebeca Soria, al JIVE, Holanda), al tiempo que captaba para el IGN a radioastrónomos ya formados en estas técnicas y campos de aplicación (Jean-François

⁷Estrellas de neutrones en rotación que emiten por impulsos de periodo muy estable.

Desmurs, procedente del Observatorio de Burdeos, Francia; María José Rioja, procedente del Instituto de Radioastronomía de Bolonia, Italia).



Figura 9: Instituto Conjunto para el VLBI en Europa (JIVE). a) sede central del Observatorio de Dwingeloo (Holanda); b) correlador para 16 estaciones.

Pero ha habido una actuación de fundamental importancia en el desarrollo y consolidación de la VLBI europea, en la que la participación del IGN ha sido crucial: la creación y subsiguiente consolidación operativa del

Instituto Conjunto para la VLBI en Europa (conocido por sus siglas en inglés como JIVE, Joint Institute for VLBI in Europe), asunto al que voy a referirme a continuación.

A finales de los años 80 y comienzos de los 90, ya se había hecho patente la necesidad de incrementar muy notablemente las capacidades técnicas del correlador de datos del Instituto Max-Planck de Radioastronomía de Bonn, que era el que la EVN y el Instituto de Geodesia de la Universidad de Bonn habían venido utilizando desde el comienzo de sus actividades. Por aquellos años, Alemania se encontraba realizando un gran esfuerzo económico con motivo de su reunificación, por lo que las inversiones en el desarrollo de sus instalaciones científicas se habían visto afectadas. La EVN tomó entonces la iniciativa de crear un nuevo centro que tuviese como principal misión, la instalación, puesta en marcha y funcionamiento operativo de un nuevo correlador de datos VLBI, con capacidades técnicas que permitiesen esa función para los telescopios existentes en aquellos momentos, y previendo la incorporación de aquellos otros que se irían incorporando a corto y medio plazo. Se fijó así que el nuevo correlador tuviese capacidad técnica y operativa para la correlación simultánea de los datos de hasta 16 radiotelescopios. Ese nuevo correlador contaría para su funcionamiento con personal y medios financiados por la EVN, constituyéndose en una nueva institución a la que, como se ha dicho, se denominó Instituto Conjunto para la VLBI en Europa (JIVE). Además de su misión principal como centro para la correlación de datos, el JIVE tendría a su cargo, entre otras, funciones como promocionar y desarrollar la VLBI en Europa, prestar apoyo a los utilizadores de la EVN en los trabajos de realización de las observaciones, correlación de los datos, calibración, análisis de imágenes,... En cuanto a su ubicación, la Organización Holandesa para la Investigación, NWO, ofreció grandes facilidades de infraestructura y de financiación, que fueron determinantes para que el JIVE se instalara en dependencias a construir en el Observatorio de Dwingeloo.

Orgánicamente, el JIVE es una institución dependiente de la EVN, cuyo Consejo de Directores es el que debe marcar y aprobar las directrices de su funcionamiento. Pero la EVN es un simple consorcio establecido por los observatorios radioastronómicos que la componen para, de forma voluntaria y basada en la buena voluntad de sus participantes, ofrecer a la comunidad científica europea -y de otros países- la posibilidad de realizar observaciones de VLBI; la EVN no tiene, por tanto, entidad jurídica propia para constituir y gestionar un instituto como el JIVE que ha de manejar importantes presupuestos y contratar personal. La solución administrativa que se encontró dentro de la legislación de Holanda, fue la de que el JIVE fuese una Fundación privada sin ánimo de lucro para el fomento de la ciencia creada a nivel particular por las siete personas que, en 1993, año de su creación, éramos los miembros del Consejo de Directores de la

EVN: Harvey Butcher (ASTRON, Holanda), Richard Wielewinsky (Instituto Max-Planck de Radioastronomía de Bonn, Alemania), Rod Davies (Jodrell Bank Observatory, UK), Roy Booth (Onsala Space Observatory, Suecia), Lucía Padrielli (Instituto de Radioastronomía de Bolonia, Italia), Alain Baudry (Observatorio de Burdeos, Francia), y yo mismo (Instituto Geográfico Nacional, España). En el documento de constitución (registro) de la Fundación, cada uno de nosotros figuramos a título personal, con nuestro documento de identidad y domicilio particular. En el momento presente, soy el único de los siete “fundadores” que continúa en activo.

En noviembre de 1998, se inauguró oficialmente el correlador con capacidad para 16 radiotelescopios del JIVE, con el que se procesan los datos de VLBI de la EVN. Desde entonces, las actividades del JIVE no han hecho más que incrementarse, habiéndose incorporado al mismo China, y estando prevista la pronta incorporación de Polonia.

Financiándose en parte con fondos de la UE, en 2002, dio comienzo el proceso de conexión en tiempo real de los radiotelescopios de la EVN con el correlador del JIVE, mediante líneas de transmisión de datos de muy alta capacidad (lo que se ha venido en llamar e-VLBI, que aproxima el funcionamiento de la VLBI al de los interferómetros conectados). En 2004, se realizó la primera observación de e-VLBI entre los radiotelescopios de Onsala (Suecia), Westerbork (Holanda) y Cambridge (UK); el 3 de abril de 2009, el RT40m de Yebes se incorporaba a este selecto club y, desde entonces, participa de forma regular en este tipo de observaciones que, como he dicho en la introducción, constituyen la técnica más compleja -conceptual, instrumental y organizativamente hablando- de cuantas en la moderna astronomía se llevan a cabo desde emplazamientos en Tierra.

En la actualidad, en la EVN participan 18 observatorios radioastronómicos de 14 países, entre los que se encuentran China, África del Sur y Estados Unidos (radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico). Yebes se ha convertido en una de las estaciones de observación fundamentales de dicha red que, cuando se complete el receptor a 40-50 GHz (7 mm de longitud de onda), actualmente en construcción, cubrirá todo el rango de frecuencias de observación desde los 2 a los 120 GHz. Dominamos todos los conocimientos científicos y técnicos que intervienen en el flujo de la señal desde que es captada por la antena, hasta que es enviada, en tiempo real, al correlador; y nuestros astrónomos e ingenieros participan en todos los comités directivos, científicos y técnicos, de la EVN.

En cuanto al JIVE, se ha convertido en una institución en la que trabajan unos 25 científicos e ingenieros del más alto nivel, que dominan las técnicas de la VLBI, muy especialmente, las de la correlación y análisis de datos. Gestiona presupuestos de varios millones de euros, que obtiene por las contribuciones de las agencias financiadoras y de su participación en proyectos europeos. Por su nivel de excelencia técnica y papel jugado en proyectos espaciales de gran proyección mediática (por ejemplo,

seguimiento de la nave Huygens en su descenso a Titán), se ha convertido en el mascarón de proa de la EVN, al tiempo que en uno de sus motores.

En estos últimos veinte años, la EVN/JIVE ha experimentado un desarrollo científico-técnico y organizativo que la ha llevado a convertirse en una de las grandes instalaciones científicas internacionales más importantes del mundo y con mayor proyección de futuro. Durante todo ese tiempo, el IGN ha formado parte de ese proceso; al principio, como uno de sus furgones de cola y en la actualidad, como una de sus locomotoras.

El radiotelescopio de 40 metros del Observatorio de Yebes (RT40m)

Como ya he dicho, a finales de los 80, principios de los 90, estaba claro que la vida productiva del RT14m de Yebes tocaba a su fin. Si queríamos mantener y desarrollar una radioastronomía experimental en España, es decir, aquella que construye, pone en funcionamiento y utiliza instrumentos y equipos de observación en esa técnica, había llegado el momento de iniciar la construcción de un nuevo radiotelescopio para el que y con el que se llevasen a cabo todas esas actividades técnicas y observacionales. Con los condicionantes que siguen, esa era mi opinión y, como entonces director del Observatorio Astronómico Nacional y responsable de la radioastronomía, esa fue la decisión que propuse a la dirección del IGN.

Esos condicionantes eran:

1. Que el radiotelescopio a construir debería ser útil científicamente a nivel institucional (IGN), nacional e internacional.
2. Que su construcción debería contribuir al desarrollo técnico e industrial de nuestro país.
3. Que su instalación, puesta en marcha y equipamiento de receptores (front-ends y back-ends) debería representar la consolidación del grupo de instrumentalistas del Observatorio, o lo que es lo mismo, de la radioastronomía experimental en España.

Las respuestas a esos condicionantes eran:

1. Que un radiotelescopio de unos 40 metros de diámetro con capacidad de integrarse como uno de sus elementos más importantes en una gran instalación científica internacional como la EVN y de ser utilizado como antena única a frecuencias complementarias de las que se cubrían con los radiotelescopios del IRAM, garantizaba su rendimiento científico a nivel institucional, nacional e internacional.
2. Que ya en aquellos años, en España existían empresas capaces de diseñar y construir gran parte de un radiotelescopio de esas características.
3. Que por entonces, con la instalación, puesta en marcha y utilización del RT14m, el grupo de instrumentalistas del Observatorio había alcanzado el desarrollo en número de ingenieros y técnicos, y había acumulado

una gran experiencia en todo tipo de trabajos a realizar con vistas a esos objetivos.



Figura 10: Radiotelescopio de 40 metros de Yebe: a) vista exterior; b) sala de control; c) sala de receptores.

Para ratificar estas ideas, en 1992, organicé, con ayuda del astrónomo José Cernicharo, un workshop internacional que fijó las características técnicas que debería tener el nuevo radiotelescopio: diámetro mayor o igual que 40 metros; capaz de trabajar a frecuencias de hasta 100 GHz; concebido y equipado para ser utilizado en observaciones de VLBI y de antena única.

Fijadas estas capacidades y características técnicas y de utilización, en 1994, se encargó a la empresa Inisel Espacio (actualmente INDRA) un estudio de viabilidad de construcción de tal radiotelescopio en nuestro país. Su conclusión fue ratificar esa viabilidad. A partir de ese momento, puse manos a la obra para la construcción del nuevo radiotelescopio. Y digo puse, porque a finales de ese año 1994, José Cernicharo obtuvo una plaza de profesor de investigación en el CSIC y dejó su puesto de astrónomo en el IGN.

Principales características del RT40m

Diámetro	40 m
Diámetro del subreflector	3,28 m
Montura	Altacimutal
Foco	Nasmyth
F/D	7,9
Rango de frecuencias de uso	2 a 115 GHz
Receptores	S/X (2,3 y 8,4 GHz) C (3,3, 5 y 6 GHz) K (22 GHz) Q (45 GHz) W (85 a 115 GHz)

Como ya he mencionado anteriormente, durante los años 1983 a 1986 yo había ocupado el puesto de codirector de la Estación IRAM de Granada-Pico Veleta. Durante ese tiempo, mi principal ocupación técnica se había centrado en la instalación y puesta en marcha del radiotelescopio de 30 metros. Así que había llegado a conocerlo muy bien y, desde luego, estaba muy claro que se trataba de un radiotelescopio de una extraordinaria calidad de construcción, con unas capacidades de observación que habían sobrepasado ampliamente las fijadas en su diseño. Ello me llevó a pensar que, para la construcción del nuevo radiotelescopio de 40 metros (en adelante, RT40m), una forma de abaratar costos garantizando al tiempo una buena calidad de construcción y logro de capacidades de observación, era que su diseño se basase en el de 30 metros de Pico Veleta, relajando las características técnicas de éste ya que el RT40m sería empleado a frecuencias mucho más bajas y en condiciones ambientales mucho menos duras. Para investigar esta posibilidad me puse en contacto con las dos empresas que habían participado en el diseño y construcción del RT30m: las empresas alemanas Krupp (actualmente Vertex Antennentechnik) y MAN (actualmente MT-Mechatronics). La idea propuesta les pareció adecuada y puede decirse que, con ello, el proyecto de construcción del RT40m de Yebe se puso en marcha; proyecto al que, como tal, puse el nombre de ARIES (Antena RadioInterferométrica Española).

A fin de minimizar los costos y lograr la máxima participación de empresas españolas, la forma de realizar el proyecto ARIES fue que una em-

presa con la experiencia técnica demostrada en la construcción de radiotelescopios de gran área colectora y muy alta precisión hiciese el diseño de ingeniería de la antena y se ocupase de la dirección de la construcción de las distintas partes mecánicas, ópticas, de servocontrol, equipamiento accesorio, etc., que la componen y de su montaje e instalación y puesta en funcionamiento. El IGN haría los contratos particulares para la construcción o suministro de cada una de esas partes y, cuando la antena estuviese en funcionamiento, instalaría los receptores que habría construido (front-ends y back-ends), instalaría programas de control que habría elaborado y realizaría los trabajos de calibración y puesta a punto del radiotelescopio, para así dar comienzo a las observaciones. Esta forma de realizar el proyecto ARIES aseguraba en la mayor medida posible la reducción de los costos y la participación de las empresas españolas, pero el esfuerzo a realizar era enorme. Tenía, no obstante, otra ventaja: los presupuestos necesarios para la construcción podrían utilizarse a lo largo de un mayor plazo y con mayor flexibilidad, así como aprovechar los presupuestos del IGN que al final de cada ejercicio quedaban libres por rebajas en las licitaciones, anulación de expedientes, etc. (en gran medida, el RT40m se financió de esa manera).



Figura 11: Visita a las obras del radiotelescopio de 40 metros del Observatorio de Yebes (1998). De izquierda a derecha: José Antonio Canas (Director General del IGN); Rafael Arias Salgado (Ministro de Fomento); Jesús Gómez González (Director del Observatorio Astronómico Nacional).

Dando comienzo a esa línea de actuación, en 1998 se sacó a concurso público el diseño de ingeniería del RT40m que fue adjudicado a la empresa

MAN. En razón de ese diseño, y como acabo de señalar mas arriba, se fueron sacando a concurso público los expedientes de las distintas partes de la antena: Algunas de estas partes fueron: el pedestal de hormigón y obra (adjudicada a la empresa ACS, Madrid); la estructura trasera y demás partes mecánicas (a Schwartz-Hautmont, Tarragona); los rodamientos (a Rothe-Erde ibérica, de Zaragoza); las cajas reductoras (a Renk, de Alemania); los paneles reflectores (a COSPAL, de Italia); las instalaciones generales (a Elimco, de Sevilla); etc.



Figura 12: Sus Altezas Reales los Príncipes de Asturias descubren la placa conmemorativa de la inauguración del Radiotelescopio de 40 metros del Observatorio de Yebes (26 de abril de 2005).

En 1998, dio comienzo la construcción del pedestal de la antena, siendo colocada la “primera piedra” por el entonces Ministro de Fomento D. Rafael Arias Salgado. Durante los años siguientes, la construcción de los distintos componentes y su montaje e instalación fueron progresando del modo previsto y el 26 de abril de 2005, festividad de San Isidoro de Sevilla, patrón del IGN, Sus Altezas Reales los Príncipes de Asturias inauguraron la nueva antena.

Debo decir aquí, que ya desde el momento en que se adjudicó a MAN el proyecto de ingeniería, mi viejo amigo y compañero de fatigas, Alberto Barcia, se puso a trabajar conmigo en el proyecto ARIES. Poco después fue el astrónomo instrumentalista (ingeniero de telecomunicaciones) José Antonio López Fernández quién se unió al proyecto. Muchos fueron los

viajes que juntos hicimos a Alemania, Tarragona, Italia,... para discutir aspectos técnicos y planificar trabajos. Desde esos primeros momentos pusimos a trabajar en los servos y equipamiento de infraestructuras (SAI, grupo electrógeno,...) al joven astrónomo instrumentalista (ingeniero industrial) Carlos Albo. Y así, poco a poco, y encargados de distintas funciones o tareas, se fueron incorporando al proyecto astrónomos, ingenieros, técnicos, ayudantes, hasta llegar al momento actual en el que la práctica totalidad del personal científico-técnico de Yebes ha contribuido, y contribuye en muy gran medida, a que el RT40m haya comenzado su andadura de utilización en las observaciones más punteras de VLBI y de antena única.

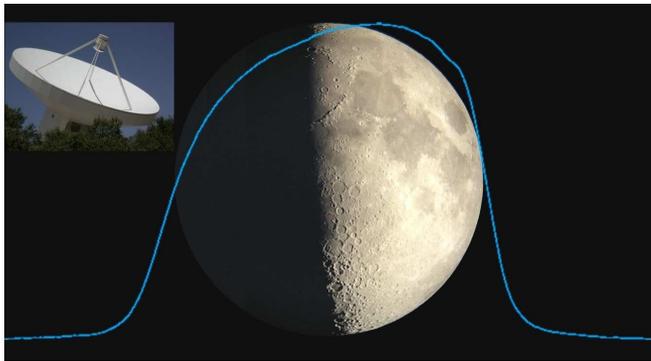


Figura 13: Barrido en ascensión recta de la Luna a 22 GHz (primera luz) realizado con el radiotelescopio de 40 metros del Observatorio de Yebes, el día 21 de junio de 2007.

El 21 de junio de 2007 se hizo la primera prueba de funcionamiento del RT40m (lo que, tradicionalmente, los astrónomos llamamos la “primera luz”) por observación de un objeto astronómico: como en 1979, la Luna (figura 13). En 2008, el RT40m participó por primera vez en una sesión de VLBI y, como ya he mencionado, el 3 de abril de 2009 -30 años después de nuestra primera observación de la luna con el RT14m- se realizaba con éxito la primera observación de e-VLBI.

Desde esas primeras sesiones de VLBI hasta el momento presente (octubre de 2010), el RT40m ha participado de forma regular en un total de 52 sesiones de la EVN/IVS (7 -de 2-3 semanas de duración- astronómicas y 45 -de 1 día de duración- geodésicas), siendo considerado, a nivel de la EVN, como el mejor de sus telescopios a frecuencias por encima de los 22 GHz. Las primeras pruebas de observaciones espectrales como antena única se realizaron también durante la “primera luz”. Sin embargo hemos esperado hasta este mismo año 2010, para contar con un nuevo sistema espectral (autocorrelador FFT) de gran resolución y banda pasante

adecuada para dar comienzo al uso regular del RT40m en observaciones de este tipo como antena única.

El día de San Isidoro (26 de abril) de este año 2010, el proyecto ARIES recibía el premio al mejor proyecto del Plan Estratégico del IGN.

Proyectos en curso y desarrollos futuros de la radioastronomía en el IGN

Durante estos últimos 30 años, el IGN ha llevado a cabo la labor pionera en nuestro país de implantación y desarrollo de una nueva técnica observacional, la radioastronomía, y la ha aplicado a sus campos de interés en astronomía y en geodesia. Nuestros ingenieros dominan esta técnica “de arriba abajo” (lo que en este caso podría querer decir, dominar todos los procesos que intervienen desde que la señal electromagnética se propaga por nuestra atmósfera en dirección de la antena, hasta que es digitalizada por los “back-ends” de los receptores para su registro en el soporte que sea, o para su envío en tiempo real a los centros de correlación -caso de la e-VLBI-). Nuestros astrónomos han alcanzado -a una edad muy temprana- un gran reconocimiento/prestigio internacional y son regularmente invitados a impartir conferencias en congresos internacionales, publicar artículos de puesta al día (review papers), participar y, frecuentemente, presidir instituciones científicas europeas y mundiales, comités de programas, comités asesores científico-técnicos, etc. Sinceramente, creo que constituimos un equipo científico-técnico con una capacidad de actuación envidiable: nuestros ingenieros diseñan y construyen componentes que forman parte de los equipos receptores de telescopios espaciales (por ejemplo, el telescopio espacial FIRST/Herschel), con los que se obtienen datos observacionales de extraordinaria calidad e interés científico que son analizados e interpretados por grupos de expertos internacionales con participación y, en muchos casos, liderazgo de los astrónomos del IGN.

En razón de estas capacidades, en la actualidad nuestros ingenieros y astrónomos participan en una serie de grandes proyectos internacionales (algunos de ellos, mundiales) como los que, muy brevemente, voy a mencionar a continuación.

El proyecto ALMA (Gran Interferómetro Milimétrico de Atacama)

Se trata del proyecto de construcción, instalación y puesta en funcionamiento operativo de un interferómetro para ondas milimétricas y submilimétricas (hasta 0,3 mm de longitud de onda), compuesto por 54 antenas de 12 metros de diámetro y 12 antenas de 7 metros de diámetro (estas últimas aportadas por Japón), emplazado (para poder observar a longitudes de onda tan cortas) a 5 000 metros de altitud, en el desierto de Atacama

(el más seco del mundo), en Chile. Cuando este interferómetro entre en funcionamiento (lo que, con un número reducido de antenas -unas 10- está previsto que ocurra en 2012), será durante décadas, el mejor instrumento del mundo a esas frecuencias, y su campo de aplicación abarcará desde los estudios cosmológicos, hasta los de nuestro propio sistema planetario.



Figura 14: Gran Interferómetro Milimétrico de Atacama (ALMA):
a) Impresión artística; b) primeras antenas en Atacama; c) edificio de control y del correlador.

El proyecto ALMA (siglas en inglés de Atacama Large Millimeter Array), es un proyecto financiado por la Unión Europea (a través del Observatorio Europeo del Sur, ESO), los Estados Unidos (a través de su Observatorio Nacional de Radioastronomía, NRAO), Canadá y Japón, siendo su coste total de construcción de unos 1 300 millones de dólares.

El IGN fue, por su experiencia en radioastronomía milimétrica (instrumentación y actividades científicas), la institución española que, en el año

2000 -cuando el proyecto ALMA estaba comenzando su fase de diseño y organización- tomó la iniciativa de participar activamente en él. Esto hizo que, enseguida, el grupo de radioastrónomos del CSIC, liderado por José Cernicharo (astrónomo al que, como becario del IGN, dirigí su tesina de licenciatura en Yeves, y que, ya como astrónomo de nuestro instituto, fue mi colaborador en los inicios del proyecto ARIES), promovió la participación del Ministerio de Ciencia y Tecnología en el proyecto ALMA. Fue así que en 2003, el Ministerio de Fomento y el Ministerio de Ciencia y Tecnología firmaron un acuerdo de colaboración para la participación española en el proyecto ALMA, en el que se hacía una encomienda de gestión al IGN para ocuparse de coordinar dicha participación. Este acuerdo funcionó hasta el año 2006 en el que España se adhirió a la ESO, con lo que los gastos de la contribución española a ALMA quedaron englobados en la cuota de participación en ese organismo.

En cuanto al desarrollo instrumental del proyecto ALMA, durante estos diez años transcurridos desde 2000, los ingenieros de Yeves han diseñado y construido los amplificadores de frecuencia intermedia (FI), de banda ancha y muy bajo ruido (refrigerados a temperaturas criogénicas de unos 15 K), para los receptores de las frecuencias de observación 7 (275-373 GHz) y 9 (602-720 GHz); en total más de 452 amplificadores, por lo que, para su fabricación masiva, se ha transferido nuestra tecnología a empresas españolas.

Por otra parte, los astrónomos e ingenieros del IGN continuamos participando en todas las comisiones y grupos de trabajo científico-técnico de ALMA, a nivel nacional, a nivel del ESO y a nivel del proyecto ALMA. En este sentido, cabe señalar que el IRAM (que como se ha dicho, es, en parte, una institución del IGN) se ha convertido en uno de los Centros Regionales de ALMA (ARC) en los que se ha estructurado ese proyecto; centros que tienen como misiones el desarrollo de instrumentación, el procesado de datos, y la formación científica-técnica de los futuros utilizadores del interferómetro, entre otras actividades.

El proyecto NOEMA (Interferómetro Milimétrico Ampliado del Norte) del IRAM

La ubicación de ALMA en el hemisferio Sur se debe, principalmente, a la excelencia de su emplazamiento para las observaciones a longitudes de onda submilimétricas (Atacama) y a la mayor concentración de objetos de interés astronómico en ese hemisferio Sur celeste (centro galáctico, Nubes de Magallanes,...). Pero en el hemisferio Norte también resulta necesaria la posibilidad de hacer observaciones interferométricas a muy altas frecuencias (objetos astronómicos de gran interés, objetos observados por todas las técnicas durante siglos, nuevos objetos o fenómenos astrofísicos que pudieran aparecer,...).

Por esta razón, el IRAM ha elaborado el proyecto de ampliación del interferómetro del Plateau de Bure, en cuanto a número de antenas (de 6 a 12) y en cuanto a la extensión de la longitud de sus líneas de base (línea Este-Oeste, de 800 a 1600 metros). Con ello se duplicaría su área colectora (sensibilidad) que llegaría a ser casi un 40 % de la de ALMA, su rapidez de observación (de 15 líneas de base instantáneas pasaría a 66) y su resolución angular. El interferómetro del Plateau de Bure se convertirá así en el interferómetro milimétrico del hemisferio Norte. El IGN, como uno de los socios del IRAM, participa activamente en el desarrollo de este proyecto que, en una primera fase, se limitará a la ampliación en 4 antenas. Está previsto que el proyecto NOEMA dé comienzo en 2011.



Figura 15: Impresión artística del proyecto NOEMA (Interferómetro Milimétrico Ampliado del Norte) del IRAM.

El proyecto SKA (Interferómetro de Kilómetro Cuadrado)

Este es un proyecto mundial en el que participan países de Europa, de América, de Asia, de África y de Oceanía, en los se que llevan a cabo actividades en radioastronomía. Se trata de construir un interferómetro con un área colectora total de 1 km^2 para trabajar a longitudes de onda centimétricas (hasta $\sim 30 \text{ GHz}$). Aunque todavía no está definida (el proyecto se encuentra en su fase de estudios de viabilidad y de definición técnica), esa área colectora estará compuesta por “módulos” -que, probablemente, emplearán distintas tecnologías (antenas parabólicas, antenas planares,...)- distribuidas en torno a un módulo central principal, en una extensión de unos $2000 \times 2000 \text{ Km}$ (figura 16 a). Varios países del mundo han postulado por la instalación del SKA en su territorio, principalmente, algunos de los situados en el hemisferio Sur, por las razones comentadas en el proyecto ALMA, y por el mismo hecho de que ALMA -que será el radiotelescopio más importante del mundo para ondas milimétricas y submilimétricas

durante décadas- está instalándose en ese hemisferio (el SKA complementaría la posibilidad de observar ese mismo cielo Sur a frecuencias centimétricas). Descartados por razones técnicas los emplazamientos de Brasil y Argentina, parece que el futuro emplazamiento del SKA estará situado en África del Sur o en Australia.

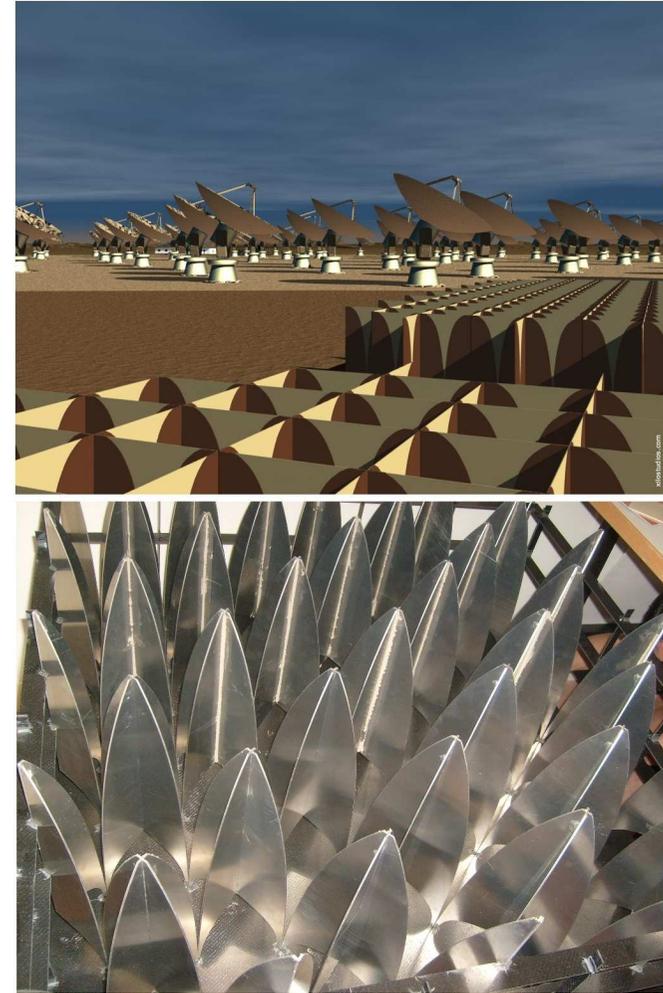


Figura 16: Interferómetro de Kilómetro Cuadrado (SKA): a) Impresión artística; b) prototipo de módulo de antena planar desarrollado en el Observatorio de Yebes.

Para la gestión organizativa y de definición y desarrollo técnico del SKA se han constituido, a nivel global y regional, oficinas y comités que llevan a cabo esas labores. Los desarrollos técnicos se realizan en institutos de radioastronomía de los distintos países, y en ese tipo de trabajos, el IGN, con financiación de proyectos por la UE, ha colaborado en el proyecto SKA desde sus etapas más tempranas y continuará haciéndolo en el futuro. Por ejemplo, uno de esos proyectos ha sido el diseño y construcción de un módulo de antena planar (figura 16 b), como los que podrían constituir una parte del área colectora del SKA.

Los proyectos espaciales FIRST/Herschel (Telescopio Espacial para Infrarrojo Lejano) y VSOP2 (Programa de Observatorio Espacial de VLBI)

Durante los últimos años, los ingenieros y astrónomos del IGN vienen participando en proyectos espaciales, colaborando en el desarrollo de los instrumentos de observación embarcados y en el análisis e interpretación de los datos obtenidos.

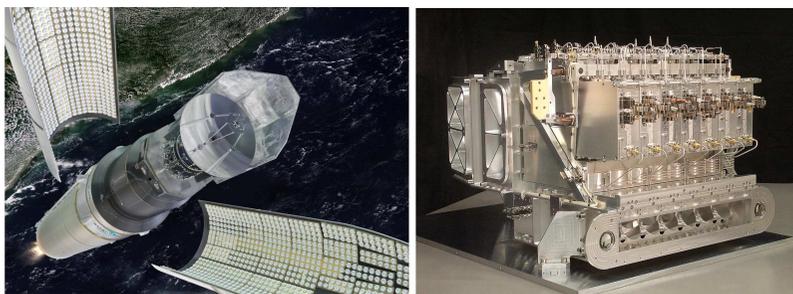


Figura 17: Telescopio Espacial para Infrarrojo Lejano (FIRST/Herschel): a) Impresión artística; b) módulo HIFI (Heterodyne Instrument For the Infrared) que lleva instalados amplificadores de frecuencia intermedia desarrollados en el Observatorio de Yebes.

Como he dicho más arriba, nuestros ingenieros diseñaron los amplificadores de frecuencia intermedia del receptor HIFI (Heterodyne Instrument For the Infrared) del telescopio espacial para observaciones en el infrarrojo lejano, que ha sido llamado FIRST/Herschel, y que fue lanzado, con éxito, al espacio el pasado 14 de mayo de 2009. Los datos obtenidos están siendo analizados e interpretados por grupos de expertos internacionales, en los que participan (en muchos casos, liderándolos) radioastrónomos del IGN.

En el momento presente, el IGN, a través de su Observatorio de Yebes, participa, de forma muy destacada, en la preparación técnica del

sector de Tierra del proyecto japonés de VLBI espacial, VSOP2. Este proyecto (segundo del mismo tipo que realiza Japón) tiene como objetivo situar una antena de 9,2 metros, en una órbita de 25 000 km de apogeo, capaz de trabajar a frecuencias de hasta 45 GHz (7 mm de longitud de onda), para realizar observaciones de VLBI formando red con antenas de gran área colectora (que compensen la poca área de la antena espacial) situadas en Tierra. Una de esas antenas será el RT40m de Yebes, una de las más grandes del mundo y de mayor calidad para observar a esas frecuencias. Por otra parte, el RT14m será utilizado como una de las estaciones de seguimiento (transmisión de comandos y recepción de los datos observacionales) del vehículo espacial. Para ello está en estudio, junto con la Agencia Espacial Japonesa JAXA y con apoyo financiero del Centro de Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) de España, la adecuación del RT14m para ese uso, mediante la mejora de su estructura mecánica y sistema de control (debe moverse a mayor velocidad), y por la instalación de los equipos de transmisión y recepción de comandos y señales (a frecuencias de ~ 30 GHz) hacia y desde el vehículo espacial; estos equipos serán provistos por la JAXA.



Figura 18: Impresión artística del Programa de Observatorio Espacial de VLBI (VSOP2).

El lanzamiento del VSOP2 está previsto para el año 2017.

El proyecto RAEGE (Red Atlántica de Estaciones Geodinámicas y Espaciales)

El proyecto RAEGE es un proyecto del IGN y del Gobierno Regional de Azores (GRA) que tiene como objetivo el establecimiento de una Red hispano-portuguesa de Estaciones Geodinámicas y Espaciales, mediante la instalación y operación de 4 estaciones geodésicas fundamentales (EGF) equipadas con radiotelescopios que cumplen las especificaciones del proyecto elaborado por el Servicio Internacional de VLBI Geodésico y Astrométrico (IVS) denominado VLBI2010, a fin de alcanzar precisiones del orden de 1 milímetro en la determinación de distancias intercontinentales (de miles de kilómetros). Estas 4 EGF se instalarán: 1 en Yebes; 1 en Canarias (Gran Canaria o Lanzarote) y 2 en las Islas Azores (1 en Santa María y 1 en Flores) (figura 19 a).

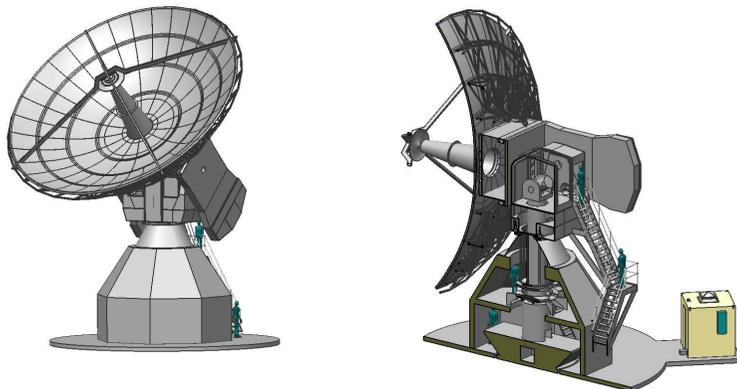


Figura 19: Red Atlántica de Estaciones Geodinámicas y Espaciales (RAEGE). a) Emplazamiento geográfico de las estaciones. b) Diseño básico de radiotelescopio del tipo VLBI2010 para VLBI geodésico, que se instalará en cada una de las estaciones.

El equipamiento inicial de cada una de estas estaciones será: un radiotelescopio para VLBI geodésico del tipo fijado por el IVS en el proyecto VLBI2010 (figura 19 b); un gravímetro (superconductor o gphone); una estación GNSS permanente; y, para la estación de Yebes, una estación SLR (Satellite Laser-Ranging, medida por laser de distancias a satélites).

La distribución espacial de las estaciones a construir (Yebes, Canarias, Azores) ha sido considerada por los mejores expertos internacionales (IVS) como muy valiosa para los estudios geodésicos y geodinámicos a realizar, tanto por su distribución y localización geográfica como tectónica (placas Europea, Africana y de Norte América).

Desde el punto de vista técnico, RAEGE incorpora la instrumentación más moderna para los radiotelescopios a utilizar. La construcción de las antenas, de 13,2 metros de diámetro, capaces de trabajar a frecuencias de hasta 90 GHz y de moverse a velocidades de hasta $12^\circ/\text{seg}$, en acimut y de $6^\circ/\text{seg}$ en elevación, han sido adjudicadas a la empresa alemana MT Mechatronics, la misma (entonces como MAN) que diseñó y dirigió la construcción de la antena del RT40m, y que es una de las más prestigiosas del mundo. En cuanto a los receptores (desde la antena focal a los back-ends) serán diseñados, construidos, instalados y puestos en funcionamiento por los ingenieros y astrónomos del Observatorio de Yebes. También estarán a cargo de Yebes la elaboración de los programas de control y la instalación y puesta a punto de los demás equipos de cada estación.

Organizativamente, RAEGE tendrá una sede principal en Yebes, que se ocupará de aspectos científico-técnicos relativos al conjunto de la Red, y una sede en Punta Delgada, capital del Azores, desde donde, inicialmente, se realizarán desarrollos instrumentales y labores de operación y mantenimiento de las estaciones de Santa María y Flores.

Las implicaciones y perspectivas de futuro de RAEGE, tanto a nivel de la colaboración científico-técnica en astronomía y ciencias de la Tierra con nuestros colegas de Portugal, como a nivel de la imbricación de las actividades en esos campos que se llevan a cabo en el propio IGN, son tan grandes que, RAEGE está llamado a jugar un papel determinante durante muchos años en nuestro Instituto.

Conclusión

A modo de conclusión, sólo me cabe decir que el camino recorrido desde aquella primera observación de noviembre de 1979, ha sido muy largo; pero el camino que se abre a los jóvenes radioastrónomos españoles -en particular a los del IGN- es mucho más largo, más amplio y, seguramente, tan apasionante de recorrer.

Agradezco al astrónomo Francisco Colomer Sanmartín su ayuda en la búsqueda de datos y en la elaboración de las figuras.