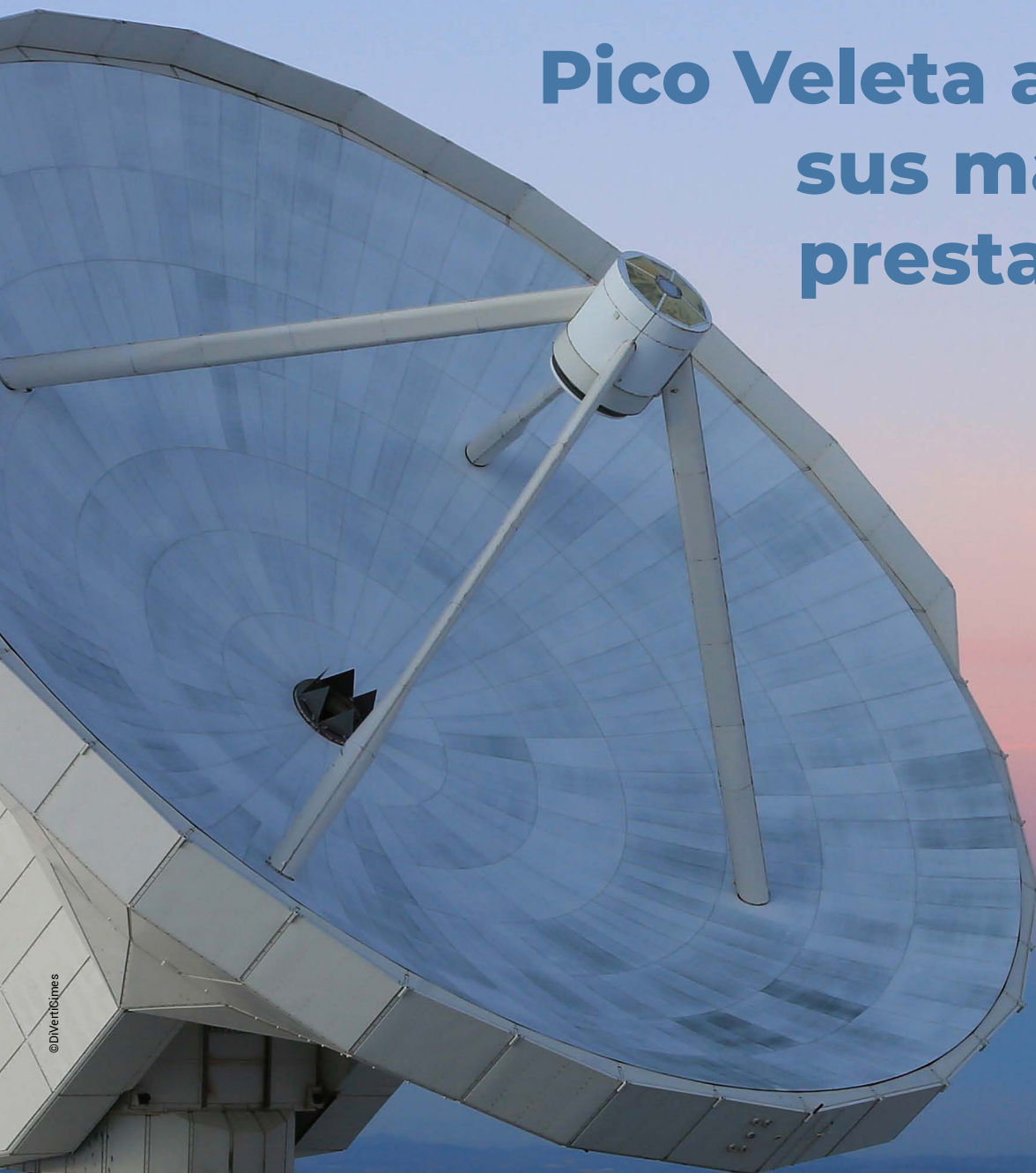


# Actualización del Sistema de Servos y de la Superficie de la Antena (ASSSA)

Un proyecto cofinanciado con fondos FEDER mediante convenio suscrito entre el Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIN) y el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG)

## Pico Veleta alcanza sus máximas prestaciones



©DVeritimes

 <b>MINISTERIO DE CIENCIA, INNOVACIÓN Y UNIVERSIDADES</b>	 <b>GOBIERNO DE ESPAÑA</b>	<b>MINISTERIO DE TRANSPORTES Y MOVILIDAD SOSTENIBLE</b>	 <b>INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL</b>	 <b>iram</b> Instituto de Investigación y Desarrollo Tecnológico
 <b>UNIÓN EUROPEA</b> Fondo Europeo de Desarrollo Regional	<b>Proyecto cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)</b>			 <b>tcs</b> Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares
<b>Una manera de hacer Europa</b>				



# Pico Veleta alcanza sus máximas prestaciones

- **Texto:** Rafael Bachiller, astrónomo y director del Observatorio Astronómico Nacional (IGN)





# Mitma, a través del Instituto Geográfico Nacional, es copartícipe del radiotelescopio de tipo 'antena única' más preciso del mundo

En el majestuoso Pico Veleta, en la Sierra Nevada (Granada), a 2 850 metros de altitud se encuentra una antena parabólica de las más precisas jamás construidas por el ser humano. Uno podría pensar que es una antena que emite radiaciones para telecomunicaciones, pero no es así, es una antena diseñada específicamente para *recibir* radiaciones muy débiles: las que proceden del universo. Se trata de un radiotelescopio, de 30 metros de diámetro y su paraboloide es tan sumamente preciso que sus desviaciones respecto de la figura matemática ideal son inferiores al grosor de un cabello humano.

Este colosal telescopio es el fruto de 40 años de cooperación entre el Centro Nacional de Investigación Científica (CNRS, Francia), Max-Planck-Gesellschaft (MPG, Alemania) y el Instituto Geográfico Nacional (Mitma, España). Construido y operado por el Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM), este instrumento ha sido fuente de importantes descubrimientos. Durante los últimos meses se ha llevado a cabo el proyecto ASSSA de mejora del radiotelescopio que, mediante una inversión que supera los 2M€, elevan su precisión y su potencia de observación. Gracias a ello, el telescopio ofrece ahora unas prestaciones óptimas.





## Desde la ladera

del esbelto Pico Veleta se disfruta de una panorámica grandiosa: la Sierra Nevada discurre suavemente hasta alcanzar la ciudad de Granada y, en los días claros, se puede divisar el mar Mediterráneo y hasta las montañas norteafricanas del Atlas. Es el segundo pico más alto de la Península, después del Mulhacén, un lugar privilegiado para la contemplación del paisaje, pero también un sitio magnífico para observar el firmamento. La buena climatología de Andalucía, junto con la alta altitud y la baja humedad, hacen que desde ahí los cielos sean particularmente transparentes.

Por eso, desde mediados del siglo XX, ha habido telescopios instalados en la sierra. Los jesuitas construyeron, en 1965, el Observatorio del Mojón del Trigo, a 2605 metros de altitud y, cuando este quedó obsoleto, hacia 1981, el Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC), inauguró el Observatorio de Sierra Nevada, en el término

municipal de Borreguiles, a 2896 metros de altitud. Equipado con dos telescopios ópticos de 0,9 y 1,5 metros de diámetro, este observatorio sigue operativo en nuestros días. Pero este artículo, no trata de la observación del cielo en luz visible, sino de su estudio mediante las ondas de radio.

### Colaboración internacional

En los años 1970, Francia y Alemania estudiaban, al principio de manera independiente, la radioastronomía de alta frecuencia (longitudes de onda milimétricas), una técnica para la observación del universo que no había sido desarrollada aún y que requería de importantes innovaciones tecnológicas. En 1979, ambos países decidieron unir esfuerzos y la Sociedad Max Planck (MPG) de Alemania junto con el Centro Nacional de Investigación Científica (CNRS) de Francia fundaron el Instituto de Radio-

astronomía Milimétrica (IRAM), con el objetivo de construir dos grandes observatorios de ondas milimétricas. Por un lado, se diseñó un interferómetro compuesto de varias antenas que sería construido en la meseta del Plateau de Bure, en pleno corazón de los Alpes franceses; y, de manera complementaria, una gran antena parabólica (de mucha mayor envergadura que las de Bure) que sería instalada en el sur de España, en la Loma de Dilar del Pico Veleta.

Si las antenas de Bure tenían unas dimensiones de 15 metros de diámetro, la de Pico Veleta tendría el diámetro mayor de lo que era capaz la tecnología en el momento: 30 metros. Hay que destacar que la observación de las ondas milimétricas que se querían captar requería una calidad soberbia para la superficie del paraboloide. El objetivo era captar ondas de entre 4 y 0,8 milímetros de longitud de onda (entre unos 70 y 370 gigahercios de frecuencia) y ello exigía que las desviaciones de esa



enorme parábola, respecto de la parábola perfecta matemáticamente, fuesen del orden unas decenas de micrómetros (milésimas de milímetros), es decir, muy inferiores al grosor de un cabello humano.

Cuando el Instituto Geográfico Nacional (IGN) fue informado del proyecto de Pico Veleta, manifestó su interés y desencadenó la firma de un acuerdo internacional entre Francia, Alemania y España para la construcción del observatorio. España cedió los terrenos, se encargó de la construcción de la carretera de acceso y proporcionó espacios para establecer unas oficinas en la ciudad de Granada. Pero, también se despertó el deseo de participar en este gran proyecto en condiciones equiparables a las instituciones alemana y francesa; por ello, el IGN se sumó al IRAM como miembro de pleno derecho en 1990.

Las oficinas  
y laboratorios

del IRAM para hacer el diseño y construcción de sus receptores se establecieron en Grenoble, (Francia). Hoy en día, en el IRAM trabajan 130 personas, de las cuales 34

están en España y su presupuesto anual asciende a unos 17 M€.

### ¿Por qué ondas milimétricas?

Las ondas milimétricas se refieren a la rama de la astronomía dedicada a la exploración del cielo

en radiofrecuencias, concretamente al estudio de la luz que emiten los objetos celestes



El radiotelescopio de 30-m con el edificio de control y oficinas en primer plano.



El radiotelescopio de Pico Veleta es tan sensible que es capaz de detectar una energía procedente del cielo similar a la de un copo de nieve que cae sobre la tierra.



El radiotelescopio mostrando parte de su parábola.

en longitudes de onda del orden del milímetro. Son longitudes de onda mucho más largas, unas 2000 veces más que las de la luz visible.

Algunos astros, como el Sol, son muy brillantes en la luz visible (el dominio óptico del espectro), pero cada objeto celeste emite diferentes tipos de luz dependiendo de su edad, composición y temperatura. Para obtener una imagen completa de un astro, la astronomía moderna combina observaciones en diferentes longitudes de onda que son complementarias entre sí. Así, el Sol también es un potente emisor de ondas ultravioletas, infrarrojas, de radio, etc. Para tener una imagen holística de todos los fenómenos que suceden en el Sol,

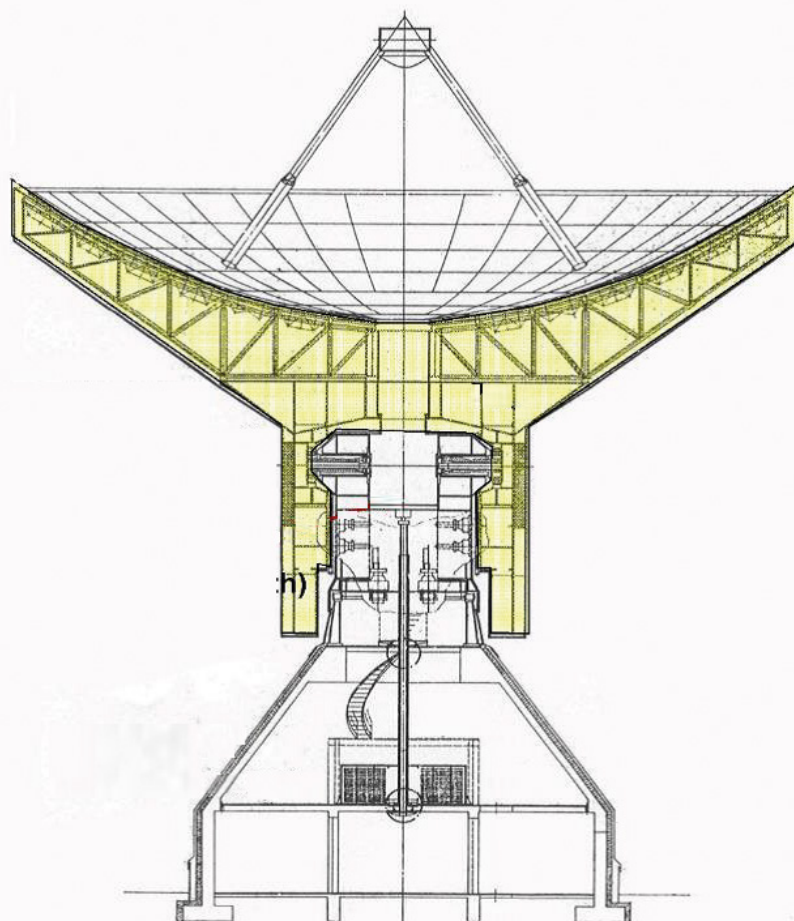
resulta imprescindible estudiar sus emisiones en todo el espectro electromagnético, desde las radiofrecuencias hasta los rayos X y gamma, pasando por el infrarrojo, el visible y el ultravioleta.

Las nubes interestelares y las galaxias muy jóvenes emiten poca luz visible, pero emiten intensa radiación infrarroja o de radiofrecuencias. Es el caso de las grandes masas nebulares que pueblan los brazos espirales de las galaxias similares a la Vía Láctea, lugares de sumo interés científico donde se forman estrellas y planetas. También los púlsares (estrellas moribundas de giro muy rápido) y las galaxias muy jóvenes y remotas emiten radiación en ondas de radio.

La radioastronomía permite “ver” estos objetos que son invisibles, es decir, que no son detectables mediante astronomía óptica. La radioastronomía es pues la técnica clave para el estudio de algunos de los procesos físicos más extremos del universo: por un lado, el medio interestelar más frío y, por otro, algunos fenómenos muy energéticos, como los púlsares, los cuásares y los agujeros negros.

### Alta precisión

Con cualquier tipo de telescopio, el astrónomo siempre intenta obtener los datos más precisos. Si se trata de imágenes, el objetivo será producirlas tan nítidas como permita la tecnología. Esto se expresa



Esquema del radiotelescopio con la parte móvil señalada en amarillo.

mediante un parámetro que se denomina resolución angular: es la separación mínima que tiene que haber entre dos puntos para poder diferenciarse el uno del otro en una imagen. La resolución angular del ojo humano está entre uno y dos minutos de arco, aproximadamente, lo que equivale a decir que permite distinguir los dos focos de un automóvil a una distancia de unos 5 km.

Cuanto menor sea el valor de la resolución angular de un telescopio más nítidas serán las imágenes que proporcione, lo que resulta fundamental para permitir el estudio de objetos muy pequeños o muy lejanos. La calidad de las imágenes no solo depende de la calidad del

propio telescopio y de su emplazamiento, existe, además, una limitación insoslayable debida a la naturaleza ondulatoria de la luz: las imágenes serán más detalladas cuanto mayor sea el diámetro del telescopio y más pequeña sea la longitud de onda a la que trabaje, es lo que se denomina límite de difracción.

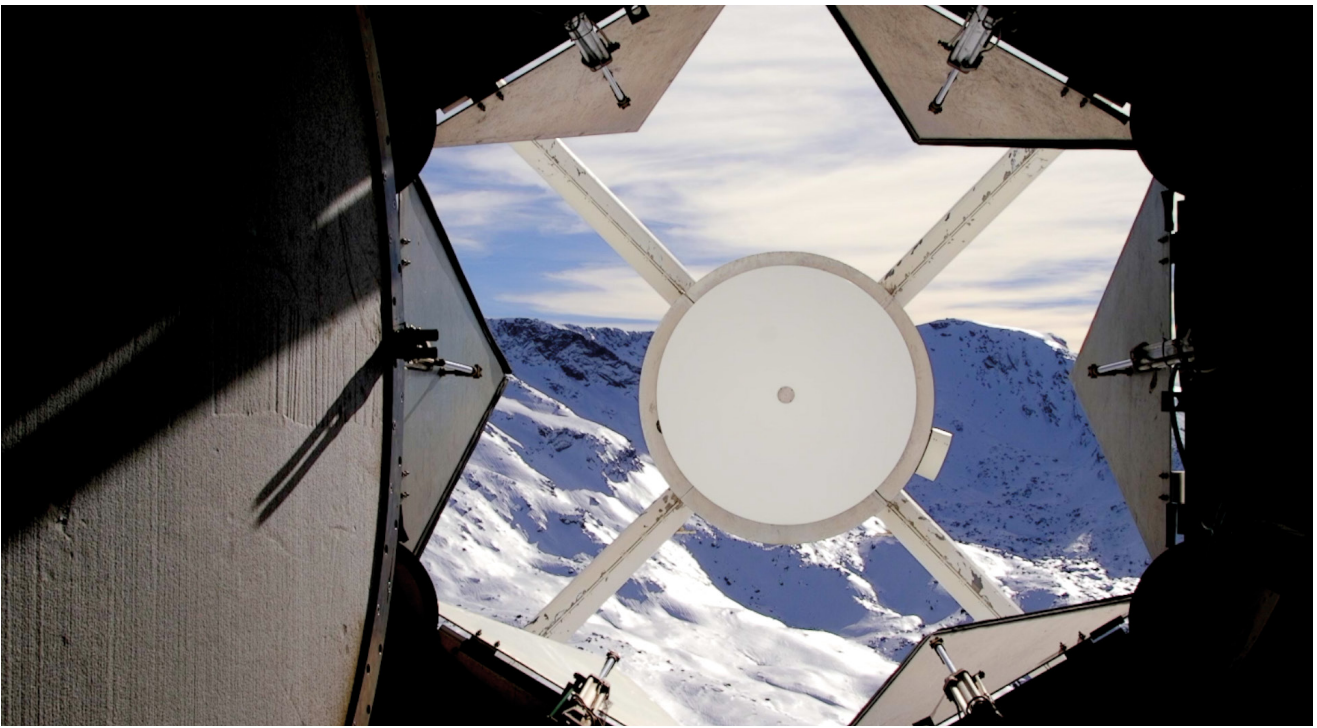
En radioastronomía milimétrica, los radiotelescopios de antena única -como el de Pico Veleta- suelen trabajar en condiciones de este límite de difracción. En este caso, debido a su alta calidad, su emplazamiento a gran altitud y su gran diámetro que le permite, trabajar en longitudes de onda del milímetro, logra captar imágenes con una

resolución de unos 10 segundos de arco. Para llegar a captar imágenes más nítidas, de mayor resolución, hay que acudir a conjuntos de grandes antenas, como el interferómetro NOEMA, también del IRAM, que está ubicado en los Alpes franceses.

### Como un ojo cósmico

Construido entre los años 1980 y 1984, el radiotelescopio de Pico Veleta comenzó a realizar observaciones profesionales en 1985. Desde entonces trabaja 24 horas al día, los 365 días del año. Contrariamente a los telescopios de luz visible, que solo pueden observar de noche cuando la luz solar no apantalla el cielo, los radiotelescopios pueden





Mirando desde el centro de la parábola hacia el espejo secundario

observar tanto de noche como de día, pues la radiación solar en ondas de radio no se difunde en la atmósfera como la luz visible.

Su emplazamiento no fue solo elegido por las excelentes condiciones climatológicas y de alta altitud, sino también por su baja latitud (a tan solo  $37^\circ \text{N}$ ); esto es lo que permite la observación del centro de la Vía Láctea que se encuentra en la constelación austral de Sagitario. Esta capacidad ha resultado ser de gran importancia en las observaciones que condujeron a la obtención de la primera imagen de SgrA\*, el agujero negro en el centro galáctico.

A pesar de sus 30 metros de diámetro, el paraboloide que forma este gran ojo cósmico tiene una altísima precisión. Pero, naturalmente, la antena se deforma por su propio peso de manera diferente al estar en diferentes posiciones (por ejemplo, apuntando hacia una posición cerca del horizonte, u otra próxima al zénit), y también puede deformarse por efecto del viento (por ejemplo, si sopla desde el frente tiende a abrir la parábola o a cerrarla si sopla desde atrás).

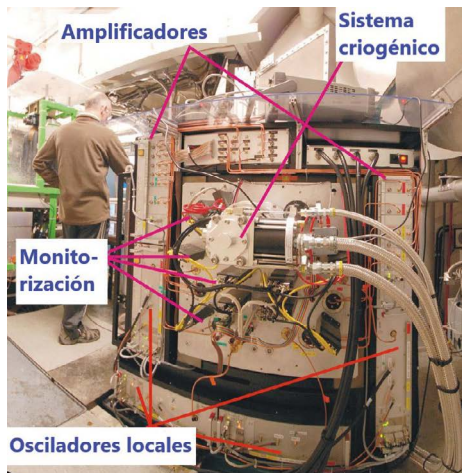
Pero los apoyos de los 420 paneles que conforman la superficie están diseñados siguiendo el principio de homología, de forma que las deformaciones debidas a estos efectos los transforman en otro paraboloide homólogo al de reposo.

Por otra parte, para evitar las deformaciones de la estructura debidas a efectos térmicos, toda la parábola está forrada, en su parte trasera, con una enorme carcasa o almacén de paneles aislantes, lo que permite hacer circular el aire por todo ese espacio eliminando

gradientes de temperatura. Un sistema de calentadores sirve de ayuda para controlar la temperatura de todo el conjunto y permite eliminar el hielo que se forma sobre los paneles en las condiciones de intenso frío.

## Receptores ultrasensibles

Una gran ventaja del radiotelescopio de Pico Veleta reside en sus receptores de altísima tecnología que permiten detectar la radiación y analizarla espectroscópicamente.



El receptor EMIR de cuatro bandas permite cubrir desde 70 hasta 370 gigahercios. A la derecha, su interior durante el montaje en laboratorio.



## Alarde tecnológico

mente en un rango entre 70 y 370 gigahercios (longitudes de onda entre 4 y 0,8 milímetros). En estos receptores, el elemento clave es el detector, una unión Superconductor-Aislante-Superconductor (SIS) que, para lograr su máxima sensibilidad, ha de ser mantenida a temperaturas del orden de 270 grados centígrados bajo cero, lo que exige equiparlos con sistemas de criogenia.

Las señales de alta frecuencia que llegan del cielo se mezclan en el receptor con otra señal de referencia procedente de un pequeño dispositivo emisor (oscilador local), obteniéndose así una señal de frecuencia más baja que puede ser amplificada, filtrada y, finalmente, enviada a un espectroscopio. Un potente ordenador digitaliza el espectro y lo almacena para poder ser analizado por los astrónomos con todo el detalle posible.

Hay que destacar que las señales de ondas de radio que se reciben del firmamento son extremadamente débiles. En una observación astronómica, el radiotelescopio de Pico Veleta es capaz de captar la energía equivalente a la que tiene un copo de nieve en su caída sobre la tierra. Los receptores del telescopio de Pico Veleta son los más sensibles del mundo en su género, todos ellos han sido desarrollados y construidos en los laboratorios del IRAM en Grenoble, y de su mantenimiento se ocupa el equipo técnico ubicado en Granada.

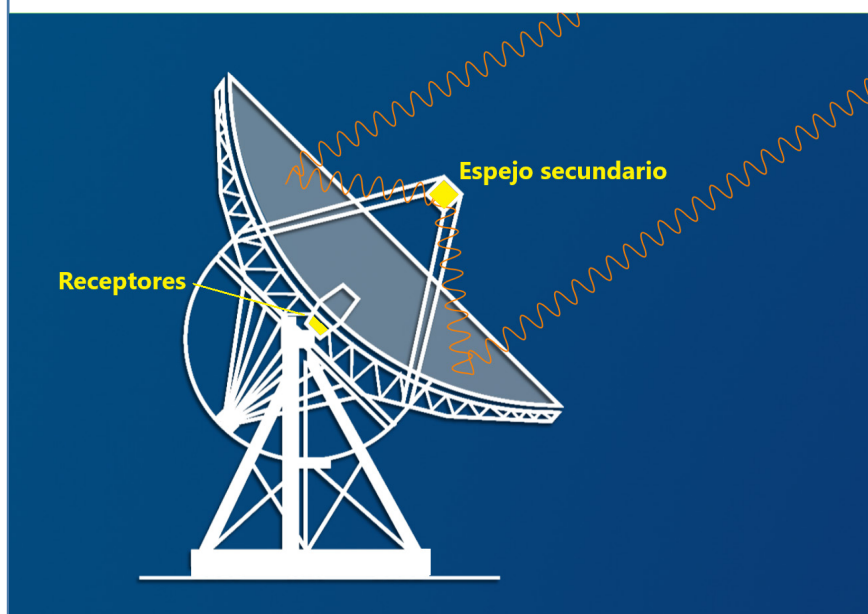
### El proyecto ASSSA de optimización

A pesar de sus 800 toneladas de peso, la parte móvil del radiotelescopio de Pico Veleta está tan bien equilibrada que, para moverse, basta con unos motores de pequeña potencia. Tales motores forman parte del sistema de servomeca-

El peso total de la parte móvil del radiotelescopio de Pico Veleta (es decir, excluyendo el basamento de hormigón) supera las 800 toneladas. El paraboloide de 30 metros de diámetro está formado por 420 paneles individuales que tienen una precisión de 30 micras y están colocados de forma que la desviación cuadrática media de la figura geométrica resultante, respecto de un paraboloide ideal, es de tan solo 50 micras (inferior al grosor de un cabello humano).

La gran parábola recoge la radiación que llega del cielo y la concentra en su punto focal, donde está situado el espejo secundario (con forma de hiperboloide). Desde allí se dirige la radiación hacia un punto, llamado foco secundario, situado sobre el eje de la parábola, pero ligeramente detrás de esta, donde se sitúan los receptores, instrumentos que detectan la radiación proveniente del cielo, la digitalizan y la envían a un potente ordenador para analizarla. Esta configuración óptica recibe el nombre de Cassegrain, un homenaje al astrónomo francés Laurent Cassegrain que la ideó en el siglo XVII.

La montura altacimutal de la parábola permite apuntar a un astro, y seguirlo en el cielo compensando el movimiento de rotación de la Tierra, con una altísima precisión, del orden del segundo de arco. Considerando que esto se consigue moviendo una masa de 800 toneladas, se concluye que se trata de un auténtico alarde tecnológico.



Esquema de un radiotelescopio

nismos encargado, por un lado, del posicionado del telescopio sobre el objeto celeste que se desea observar y, por otro, de realizar el seguimiento del mismo para compensar su desplazamiento aparente en el cielo, debido principalmente a la rotación de la Tierra. En una antena como esta, con movimiento en acimut y elevación, hay que calcular la posición del objeto observado en

el cielo a un ritmo mayor de cien veces por segundo con el fin de mantenerlo en todo momento en la línea de mirada de la antena. Es necesario para ello una gran precisión de apuntado y de seguimiento, típicamente de 1 segundo de arco en el cielo.

Adicionalmente al movimiento en acimut y elevación de la antena, también es necesario mover otros

# El proyecto ASSSA para la optimización del radiotelescopio de Pico Veleta ha sido financiado con fondos FEDER correspondientes al Programa Operativo Pluriregional de España (POPE) 2014-2020.

Las luces de Granada causan gran contaminación lumínica, pero esta no influye en las observaciones en ondas de radio.

equipos auxiliares durante la observación; en concreto, el espejo secundario, que se mueve con un mecanismo de seis motores, similar a un hexápodo, que le permite una libertad total en el movimiento tanto de desplazamientos lineales como giros. La necesidad de mover el subreflector es doble, primero para optimizar el enfoque de la geometría de antena debido a las deformaciones térmicas residuales y, segundo, para aplicar la corrección de foco impuesta por el diseño de homología que permite mantener la geometría parabólica del espejo primario a cualquier elevación.

El subreflector también dispone de un último movimiento de conmutación rápida en el apuntado al cielo, conocido como balanceo o *wobbling*, que hace posible la calibración dinámica de la señal recibida por medio del apuntado al objeto observado en el cielo y, seguidamente, a un punto de referencia próximo. Con esta calibración dinámica del objeto observado es posible corregir las fluctuaciones atmosféricas de evolución rápida



Recreación de moléculas en el espacio interestelar.

como el paso de una nube, así como la fluctuación del ruido electrónico interno del receptor.

Tras cuarenta años de operaciones, el sistema de servomecanismos del radiotelescopio había quedado obsoleto y era preciso reemplazarlo. Para ello, el IGN, a través del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) firmó un acuerdo con el Ministerio de Cien-

cia e Innovación para la cofinanciación del proyecto ASSSA (Actualización del Sistema de Servos y de la Superficie de la Antena). Gracias a esta iniciativa, se ha equipado al telescopio con un sistema nuevo y completamente actualizado de servomecanismos y se ha financiado con Fondos Europeos para el Desarrollo Regional (FEDER) por un montante de 2 M€.





IRAM/J. Pety



Mapa a gran escala de las nubes de Orión realizada con el radiotelescopio de 30-m, a la derecha puede verse la peculiar Cabeza de Caballo.

El nuevo sistema de servos aumenta las prestaciones del radiotelescopio permitiéndole, por ejemplo, realizar un bucle de comandos mucho más rápido que el inicial, o reducir las vibraciones mecánicas. También se ha implementado una nueva Unidad de Control de la Antena (ACU) que incluye un ordenador de tipo industrial para comandar tanto los

movimientos altacimutales como los del subreflector.

Gracias a todo ello, la calidad del apuntado y del seguimiento mejora considerablemente, lo que permite realizar observaciones con vientos más rápidos, con velocidades superiores a los 10 metros por segundo. Estas nuevas prestaciones también hacen posible la observación por encima de 83

grados de elevación (es decir, muy cerca del cénit), algo que no era posible antes. Además, se reducen considerablemente los tiempos muertos (*overheads*) en los que se incurre necesariamente durante toda observación astronómica.

### 5000 astrónomos

El de Pico Veleta es un telescopio astronómico que puede ser utilizado en campos muy diversos de la astronomía, observando astros de todo tipo, desde los cuerpos del sistema solar hasta las galaxias más lejanas conocidas, pasando por nubes interestelares, estrellas en diferentes estadios de su evolución y galaxias de diferentes características.

Gracias al poder de resolución y a la sensibilidad de este radiotelescopio, los científicos pueden coleccionar luz que ha viajado desde los confines del universo, durante 13 mil millones de años antes de llegar a la Tierra. Anualmente, el IRAM recibe unas doscientas solicitudes, procedentes de astrónomos de más de cuarenta países repartidos por todo el mundo, que desean

## Una ubicación singular

El radiotelescopio de 30 metros del IRAM está emplazado a 2850 metros de altitud en la Loma de Dilar, en una vertiente del Pico Veleta. Es la segunda montaña más alta de la península ibérica después del Mulhacén y uno de los lugares más meridionales que se pueden encontrar con esta altitud en la Europa continental. Su latitud de 37° N permite observar en buenas condiciones la zona en torno al centro de la Vía Láctea, una región que solo es completamente observable a altas elevaciones desde el hemisferio Sur, pero que tiene un altísimo interés para los astrónomos. Desde el Observatorio se disfrutan de unas 170 noches bien despejadas al año, muchas de ellas en verano, justamente mientras el centro galáctico es observable durante la noche, que es cuando la atmósfera tiene mayor estabilidad. El sitio es muy seco, en las frías noches de invierno la atmósfera puede tener menos de 2 milímetros de vapor de agua, lo que deja los cielos sumamente transparentes y unas condiciones óptimas para la observación astronómica.

El corazón del edificio auxiliar del Observatorio es la sala de control, desde la que se comanda el telescopio y se realizan las observaciones. Una sala para ordenadores, un taller mecánico, las oficinas y una biblioteca completan la zona de trabajo. La zona de residencia incluye unos dormitorios, comedor y cocina. Al Observatorio se puede acceder por carretera en verano, pero en invierno se llega a la estación de esquí en Borreguiles y desde allí por telecabina o mediante vehículo de cadenas a través de la nieve.

Cielos claros  
en Pico Veleta

utilizar el telescopio para llevar a cabo proyectos de investigación. Estas solicitudes son evaluadas por un comité internacional de expertos que asigna el tiempo de telescopio a los proyectos más innovadores y prometedores, basándose en criterios de excelencia científica. Se estima que unos 5000 astrónomos han utilizado ya este radiotelescopio.

### Moléculas y nebulosas

Uno de los campos en los que el telescopio ha sido más productivo es el de la detección de especies moleculares en el espacio interestelar. Actualmente, se conocen unas 250 moléculas individuales diferentes que enriquecen la composición química de las grandes nubes que pueblan el espacio que media entre las estrellas. La especie más abundante es el hidrógeno molecular ( $H_2$ ) y, después el monóxido de carbono, con una abundancia unas diez mil veces menor. Le siguen otras moléculas como el agua ( $H_2O$ ) o el amoníaco ( $NH_3$ ), etc.

El radiotelescopio ha descubierto más de sesenta de estas moléculas, lo que le hace campeón de todos los radiotelescopios del mundo en este tipo de descubrimientos. Entre las especies químicas descubiertas por este telescopio destacan la sal común ( $NaCl$ ), los cloruros de aluminio y de potasio ( $AlCl$ ,  $KCl$ ), el carburo de silicio ( $SiC$ ) y varios compuestos con fósforo. También es interesante señalar que, tras Pico Veleta, el radiotelescopio de 40-m del IGN en el Observatorio de Yebes (en Guadalajara), es el segundo radiotelescopio en número de moléculas detectadas en el espacio.

Las nubes de gas molecular que se encuentran en el espacio entre las estrellas poblando los brazos de las galaxias espirales, son a me-





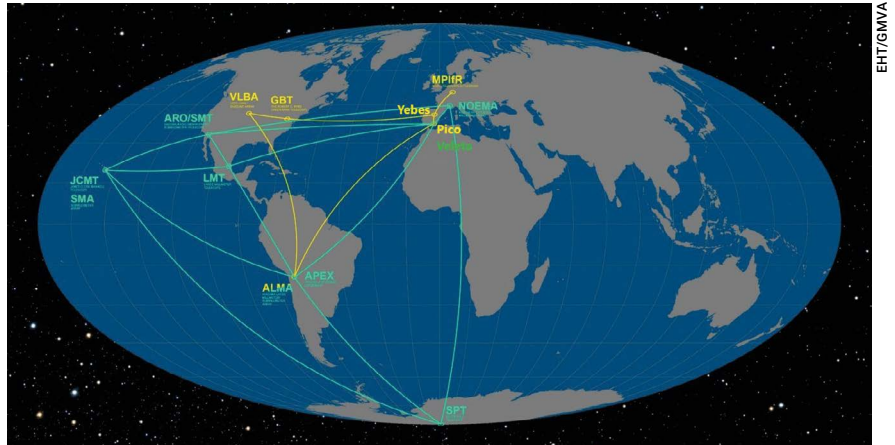
Detalle de las nubes de Orión mostrando una compleja estructura filamentosa donde nacen estrellas nuevas.

nudo frías (temperaturas típicas de unos 250 grados Celsius bajo cero) y oscuras, por eso no pueden verse en luz visible. Sin embargo, la emisión de ondas de radio -ocasionada por las moléculas que contienen- ofrece una oportunidad única para poder hacer mapas muy detallados de estas grandes nubes. De gran interés es la famosa Nebulosa de Orión, situada a 1350 años luz de distancia. El radiotelescopio de Pico Veleta ha realizado un mapa a gran escala de esta nebulosa en la emisión del monóxido de carbono. La combinación de este mapa con datos del interferómetro ALMA ha permitido localizar los lugares de la nube donde están naciendo nuevas estrellas.

### Agujeros negros

El telescopio de Pico Veleta también se ha revelado fundamental como parte de la red de telescopios conocida como Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT, por sus siglas en inglés), una colaboración internacional en la que participan radiotelescopios en Hawái, la Antártida, Chile, México, EE. UU., etc., y que es capaz de simular un radiotelescopio tan grande como el planeta Tierra.

En el año 2019, el consorcio EHT hizo pública la primera imagen de un agujero negro: el situado en el corazón de la galaxia gigante Messier 87, también conocida como Virgo A, pues se encuentra en la constelación de Virgo, y a 55 millones de años luz de distancia. Recientemente, en marzo de 2021 se han realizado medidas de la



Algunos de los radiotelescopios que componen las redes EHT y GMVA.

## El radiotelescopio de Pico Veleta es una pieza clave de la red Event Horizon Telescope (EHT) que está produciendo espectaculares imágenes de agujeros negros.

polarización de la radiación del anillo en torno a M87\*, una impronta dejada por los campos magnéticos que están presentes en el anillo. Estas observaciones son esenciales para determinar el mecanismo físico mediante el que, desde este anillo, se lanzan unos potentísimos chorros de materia al espacio extragaláctico.

Aunque el EHT es sumamente potente, en sus datos hay lagunas que permiten interpretaciones ligeramente diferentes. En un afán de obtener una imagen del agujero negro (denominado M87\*) lo más posible, muy recientemente (marzo

de 2023), se ha utilizado una técnica de Inteligencia Artificial para reprocesar los datos. Se ha conseguido así afinar la imagen, de forma que el ancho del anillo aparece más pequeño, lo que supone una nueva restricción para los modelos teóricos y tests a la relatividad general de Einstein.

En una observación aún más reciente (publicada también en 2023), llevada a cabo por otra red de telescopios conocida como GMVA (Global Millimeter VLBI Array) -en la que también participa el gran radiotelescopio de 40 metros del IGN en el Observatorio de Yebes-

## Yebes y Pico Veleta: observatorios complementarios

El radiotelescopio de 30 metros de Pico Veleta es un instrumento compartido entre el IGN español, la Sociedad Max-Planck (MPG) de Alemania y el Centro de Investigaciones Científicas francés (CNRS). Además de este instrumento, el IGN es propietario exclusivo del radiotelescopio de 40 metros del Observatorio de Yebes (cerca de Guadalajara). Este último fue construido y es mantenido en funcionamiento por el personal técnico del IGN que trabaja en él, donde cuentan con avanzados laboratorios de instrumentación en los que se diseñan y construyen los receptores de microondas.

El Observatorio de Yebes está situado en un lugar sumamente seco y sin vientos. Como el de Pico Veleta disfruta de muchos días despejados y su ubicación, a 980 metros sobre el nivel del mar, permite realizar observaciones en frecuencias desde 2 a 100 gigahercios (es decir, longitudes de onda de entre 3 milímetros y 15 centímetros). De esta forma, ambos radiotelescopios resultan altamente complementarios: el de Pico Veleta cubre las frecuencias superiores (entre unos 70 y 370 gigahercios), mientras que el de Yebes abarca todas las frecuencias más bajas que son observables desde su ubicación.

El radiotelescopio de Yebes también tiene montura altacimutal, pero a diferencia del de Pico Veleta, dispone de una sala de receptores muy amplia, ubicada en el foco secundario, donde una serie de espejos permiten redirigir la radiación recibida del cielo hacia los numerosos receptores que permiten cubrir, de manera óptima, bandas muy anchas de frecuencia y en muy diferentes rangos. Ambos radiotelescopios ilustran la alta capacidad tecnológica que, en ondas milimétricas, se ha alcanzado en Europa y, muy concretamente, en España.



El radiotelescopio del IGN en el Observatorio de Yebes (Guadalajara)

EHT y colab.



La sombra del agujero negro M87\*. De arriba a abajo: observación original, imagen procesada con inteligencia artificial y observaciones de polarimetría

se ha podido captar simultáneamente tanto la región alrededor del agujero negro como el chorro que desde allí se eyecta. Y es que, a medida que la materia gira alrededor del agujero negro supermasivo, debido a la tremenda influencia gravitacional de este monstruo cósmico, el material se calienta y, por algún mecanismo físico que involucra a los campos magnéticos,



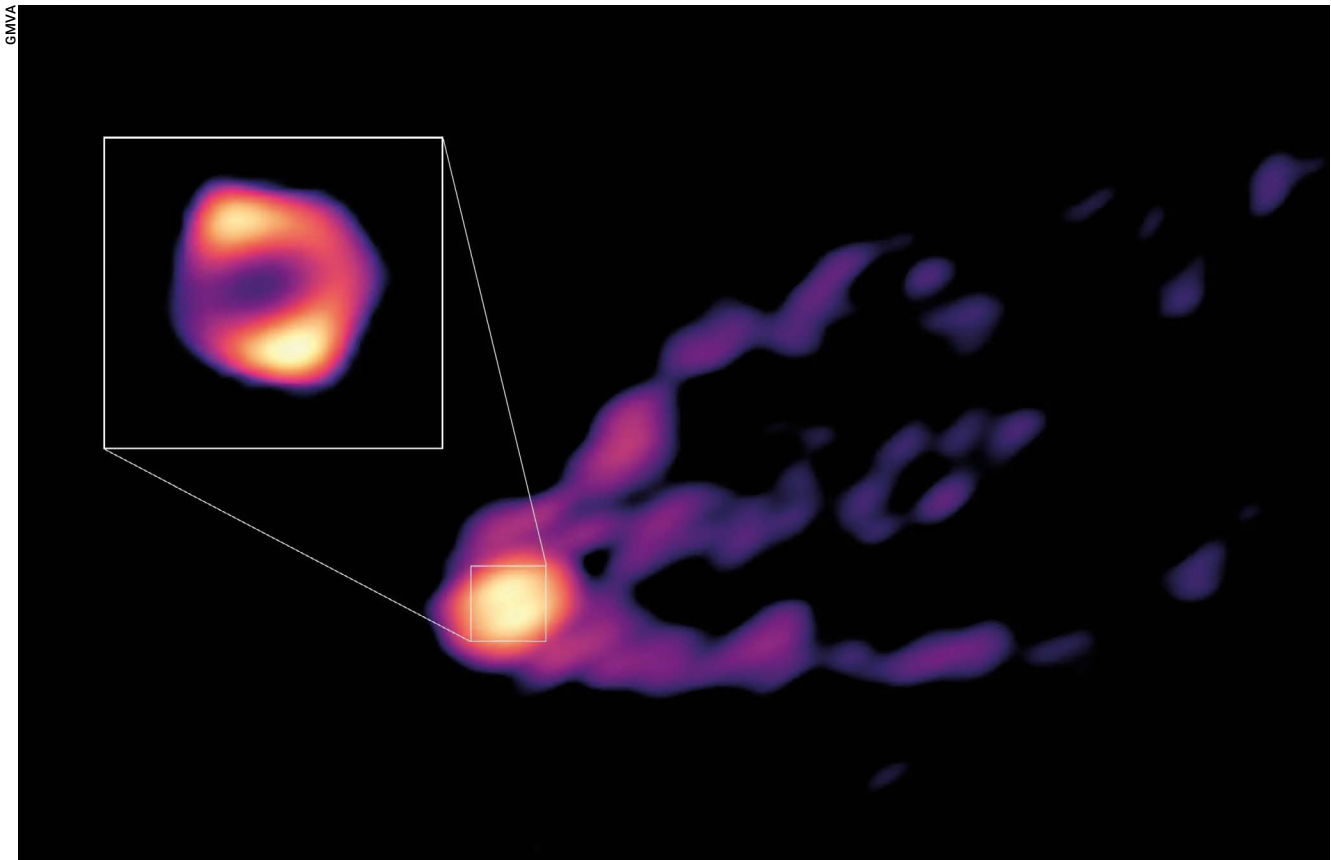
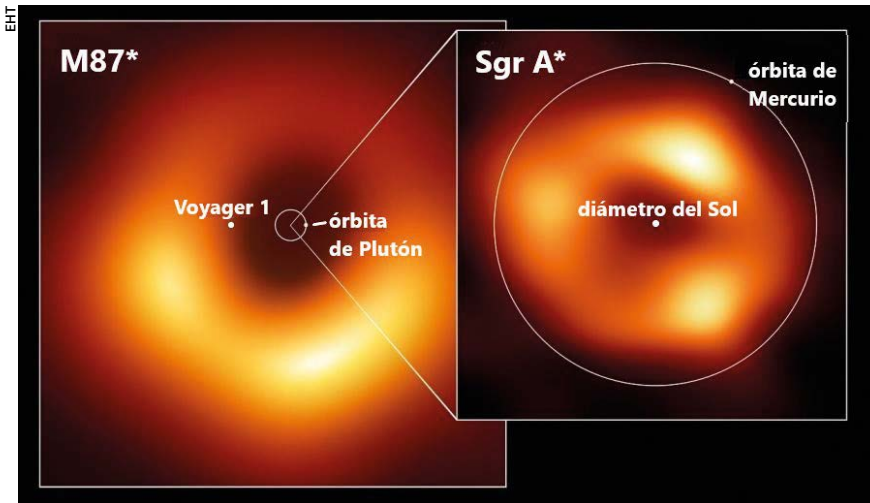


Imagen de M87\* obtenida por el GMVA en la que puede observarse tanto la sombra del agujero negro como el chorro eyectado.



Comparación de los agujeros negros en M87\* y SgrA\* ilustrando el mucho menor tamaño de este último.

pero que no se comprende todavía en todos sus detalles, parte del material es eyectado hacia el espacio a velocidades cercanas a la de la luz.

Todas las galaxias poseen un agujero negro en su núcleo. Pero, de todas ellas, la que más nos interesa es la Vía Láctea, nuestra

galaxia. Ya en 1995, el radiotelescopio de Pico Veleta obtuvo unas primeras imágenes muy detalladas de la zona central de la Vía Láctea donde se encuentra el agujero negro Sagitario A\* (SgrA\*), a unos 26 000 años luz de la Tierra. Este agujero negro está unas 2000 veces más cerca de nosotros que

M87\*, pero su observación reviste mayor dificultad ya que, al estar situado el sistema solar en el plano de la Vía Láctea, SgrA\* queda situado detrás de las colosales masas de nubes y estrellas que se encuentran en la línea de mirada. No obstante, a principios de 2022, gracias nuevamente al EHT, se pudo conseguir una imagen de este agujero negro que reviste particular importancia.

En todas estas observaciones del EHT hay que destacar que el papel jugado por el radiotelescopio de Pico Veleta es absolutamente esencial. Su localización permite una variedad de líneas de base este-oeste que unen al telescopio con los ubicados en el continente americano. Las simulaciones muestran que, sin la participación de Pico Veleta, los anillos de M87\* y SgrA\* no se habrían resuelto como anillos, sino que habrían aparecido como manchas brillantes sin forma muy definida.

El telescopio de Pico Veleta y el gran radiotelescopio de 40m del IGN en el Observatorio de Yebes son instrumentos diseñados para ser altamente complementarios. Ambos observatorios están considerados por el Ministerio de Ciencia e Innovación como Infraestructuras Científico-Técnicas Singulares (ICTS) y, por tanto, ambos están puestos a disposición de toda la comunidad científica nacional e internacional.

Los astrónomos del IGN que realizan tareas de investigación astrofísica en el Observatorio Astronómico Nacional, conocen de primera mano ambos instrumentos y han participado en sus tareas de calibración y puesta a punto, lo que les coloca en una posición privilegiada para obtener un óptimo rendimiento científico de ambos telescopios.

Las actuaciones de mejora que se han llevado a cabo en Pico Veleta con el proyecto ASSSA y las que se están llevando a cabo en Yebes aseguran un futuro largo y muy prometedor a ambos observatorios, y se vislumbran varias décadas por delante de nuevos descubrimientos sobre el universo donde los radioastrónomos españoles están emplazados en primera línea.

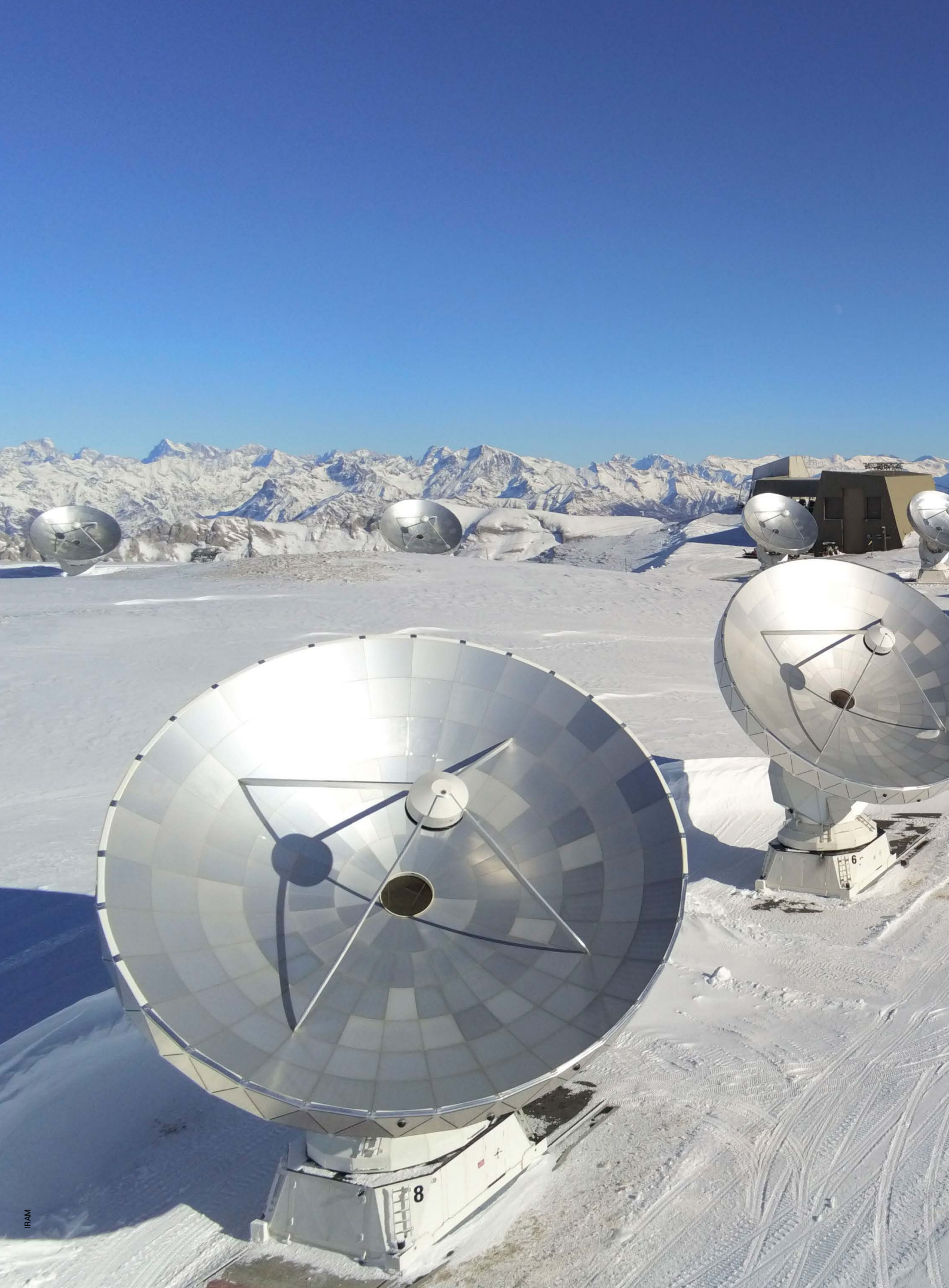
Equipados con tecnologías de vanguardia, ambos radiotelescopios son de los pocos observatorios de radio en el mundo que pueden llevar a cabo "observaciones multilínea", es decir, capacidad de detectar un gran número de firmas moleculares y atómicas simultáneamente. Estas prestaciones, combinadas con las ya mencionadas de alta sensibilidad y resolución angular, hacen de los radiotelescopios de Pico Veleta y Yebes instrumentos únicos para investigar la complejidad de la materia interestelar y los elementos constitutivos del Universo. ■

En días nublados, el radiotelescopio queda a menudo sobre las nubes y puede realizar observaciones











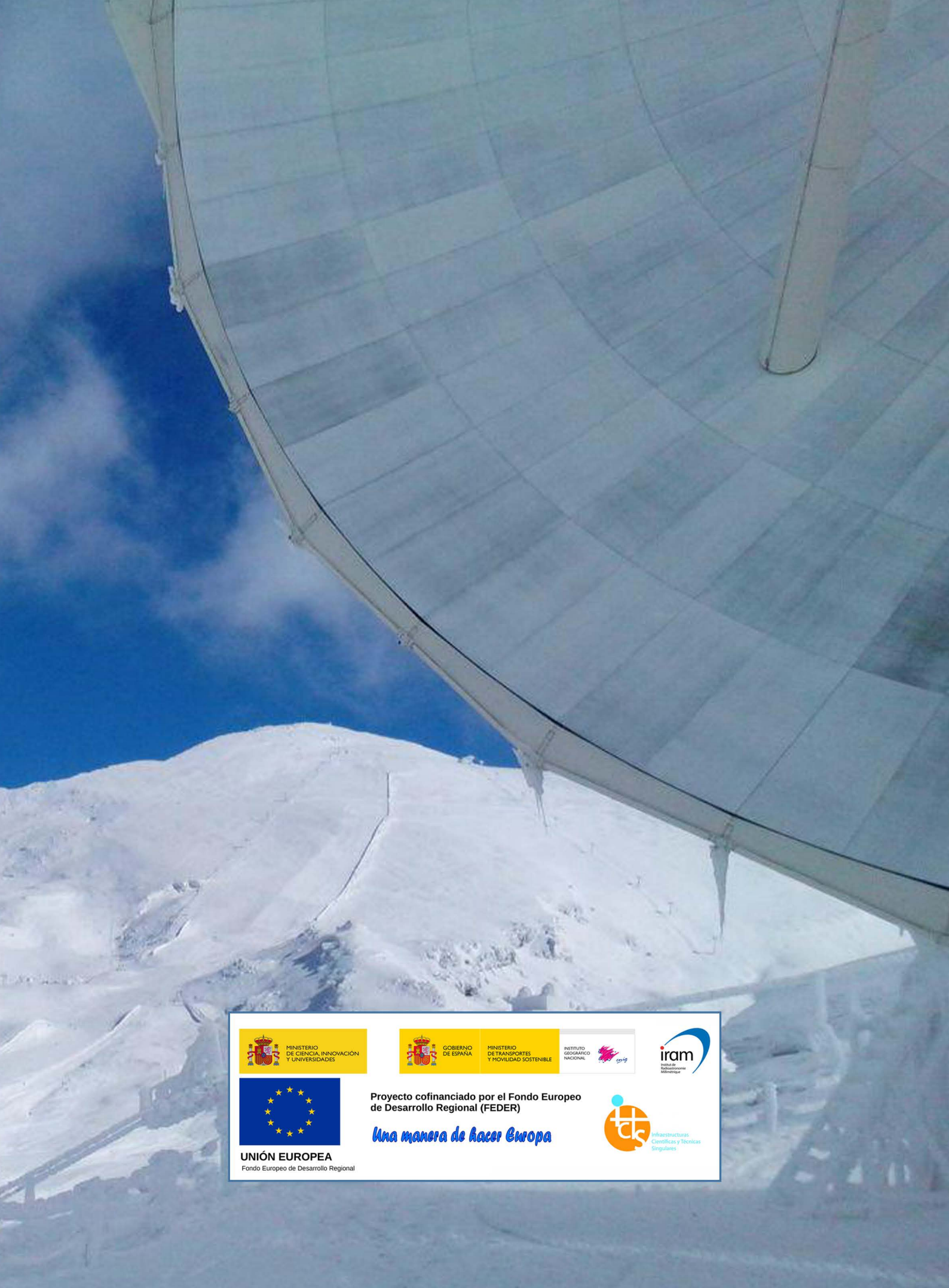
An aerial photograph showing a line of 12 large, silver parabolic radio telescope antennas mounted on a snowy mountain plateau. The antennas are arranged in a slightly curved line, pointing towards the right. In the background, there are more snow-covered mountains under a clear blue sky. To the left, there are some small buildings and a paved area. The ground is covered in snow with some tracks and patches of bare earth.

## Complemento óptimo del radiotelescopio de Pico Veleta

La red de radiotelescopios NOEMA se encuentra en una espectacular meseta del corazón del macizo alpino, a 2 500 metros de altitud cerca de la localidad francesa de Gap. Estas 12 antenas parabólicas de 15 m de diámetro cada una, de las más precisas de todo el planeta, forman el conjunto de radiotelescopios más potente del hemisferio norte trabajando en ondas milimétricas. Al igual que el radiotelescopio de 30-m de Pico Veleta, esta gran instalación científica es el fruto de 40 años de cooperación entre el IGN (MITMA, España), CNRS (Francia) y Max-Planck-Gesellschaft (MPG, Alemania). Construido y operado por el Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM), este conjunto de radiotelescopios trabaja de manera coordinada con Pico Veleta, y ya ha sido fuente de importantes descubrimientos.

Inicialmente este interferómetro tan solo contaba con 3 radiotelescopios, un número que pronto se amplió a 6. Ya en 2014 se inició el ambicioso proyecto que recibió el nombre de NOEMA, duplicando nuevamente el número de antenas para alcanzar un total de 12. En el año 2020, tras ocho años de trabajos, asistimos a la compleción de este fantástico proyecto. Sumado al radiotelescopio de 30-m de Pico Veleta, NOEMA consagra así al IRAM y, por tanto, al IGN, como líderes mundiales en interferometría de ondas milimétricas.





 <p>MINISTERIO DE CIENCIA, INNOVACIÓN Y UNIVERSIDADES</p>	 <p>GOBIERNO DE ESPAÑA</p>	<p>MINISTERIO DE TRANSPORTES Y MOVILIDAD SOSTENIBLE</p>	 <p>INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL</p>	 <p>iram Instituto de Investigación y Desarrollo en Transporte</p>
	<p>Proyecto cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)</p>			 <p>Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares</p>
<p>UNIÓN EUROPEA Fondo Europeo de Desarrollo Regional</p>	<p><i>Una manera de hacer Europa</i></p>			