

Mitma, a través del Instituto Geográfico Nacional, participa en una de las mayores infraestructuras del mundo en radioastronomía



El radiotelescopio europeo NOEMA alcanza su plena potencia

En una espectacular meseta del corazón del macizo alpino, a 2550 m de altitud, se encuentran emplazadas 12 de las antenas parabólicas más precisas de todo el planeta. Se trata de NOEMA, el conjunto de radiotelescopios más potente del hemisferio norte trabajando en ondas milimétricas. Esta gran instalación científica es el fruto de 40 años de cooperación entre el CNRS (Francia), Max-Planck-Gesellschaft (MPG, Alemania) y el IGN (Mitma, España). Construido y operado por el Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM), este conjunto de radiotelescopios, que trabaja de manera coordinada con el gran radiotelescopio de 30-m emplazado en la estación IRAM-IGN de Pico Veleta (cerca de Granada), ya ha sido fuente de importantes descubrimientos, y ahora está a punto de realizar observaciones que continuarán revolucionando el estudio del universo, en particular los estudios de formación de planetas como la Tierra.

- **Rafel Bachiller García,** Astrónomo y director del Observatorio Astronómico Nacional (IGN)

El 30 de septiembre de 2022 fue un día muy especial en la meseta del Plateau de Bure, en pleno corazón de los Alpes franceses, cerca de la localidad de Gap. Tras ocho años de trabajos, el gran interferómetro que contaba con seis antenas parabólicas en 2014, incorporaba su antena número 12 completando así el gran proyecto NOEMA. Son 12 antenas de altísima precisión y 15 m de diámetro, sus superficies parabólicas son tan perfectas que sus desviaciones de los paraboloides matemáticos son menores que el espesor de un cabello humano. Equipadas con sus receptores ultrasensibles, son capaces de escudriñar las regiones más remotas del universo conocido. NOEMA es el radiotelescopio más potente del hemisferio norte en ondas milimétricas.

Viendo lo invisible

Pero ¿qué es la astronomía de ondas milimétricas? Como su nombre indica nos referimos 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 en longitudes de onda del orden del milímetro. Se trata pues de longitudes de onda mucho más largas (unas 2000 veces) que las de la luz visible.

Cada objeto celeste emite diferentes tipos de luz dependiendo de su edad, composición y temperatura. Algunos astros, como el Sol, son brillantes en la luz visible (el

dominio óptico del espectro). Pero para obtener una imagen completa de un objeto, 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 de radio, pudiendo causar interferencias en las telecomunicaciones. Para tener una idea completa de todos los fenómenos que suceden en el Sol (y en otros astros, como la Nebulosa del Cangrejo representada en una figura adjunta) es pues necesario 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.

Los objetos más fríos del universo, no emiten luz visible, pero sí emiten radiación infrarroja o de radiofrecuencias. Es el caso de las grandes nubes interestelares que pueblan los brazos espirales de las galaxias similares a la Vía Láctea, lugares de sumo interés científico, pues es ahí donde se forman estrellas y planetas. También los púlsares (estrellas moribundas de giro muy rápido) y las galaxias muy jóvenes y remotas emiten preferentemente radiación en ondas de radio. La radioastronomía nos permite “ver” estos objetos que son invisibles, es decir, que no son detectables mediante astronomía óptica, es pues la técnica clave para el estudio de algunos de los procesos físicos más extremos del universo: por un lado, el medio

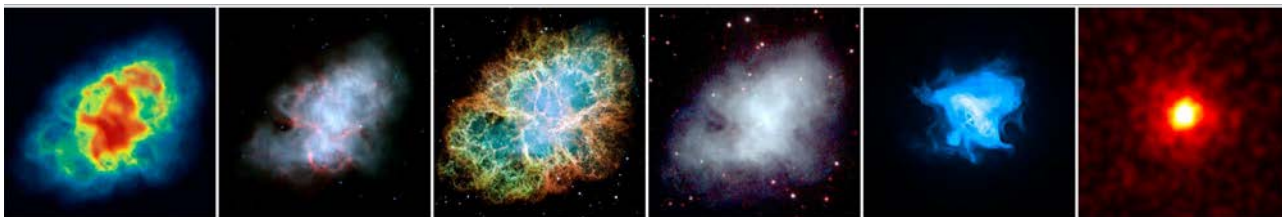
interestelar más frío y, por otro, algunos fenómenos muy energéticos, como los púlsares, los cuásares y los agujeros negros.

Buscando la nitidez

Una de las características más importantes de un telescopio es su capacidad para obtener imágenes nítidas. Esto se expresa mediante un parámetro que se denomina resolución angular: la separación mínima que tiene que haber entre dos puntos para que puedan 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 nos 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 pues eso permite el estudio de objetos muy pequeños o muy lejanos.

La calidad de las imágenes astronómicas depende de la calidad del propio telescopio y de su emplazamiento, pero además existe 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 telescopios (radiotelescopios de antena única)

La Nebulosa del Cangrejo observada a distintas longitudes de onda. De izquierda a derecha: radio, infrarrojo, luz visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma | NASA.





El Plateau de Bure en verano, en los Alpes franceses | IRAM.

suelen trabajar en condiciones de este límite de difracción, pero aun así tan solo consiguen lograr imágenes con una resolución de unos 10 segundos de arco. Se trata pues de imágenes mucho menos nítidas (más borrosas) que las que se consiguen con un pequeño telescopio óptico.

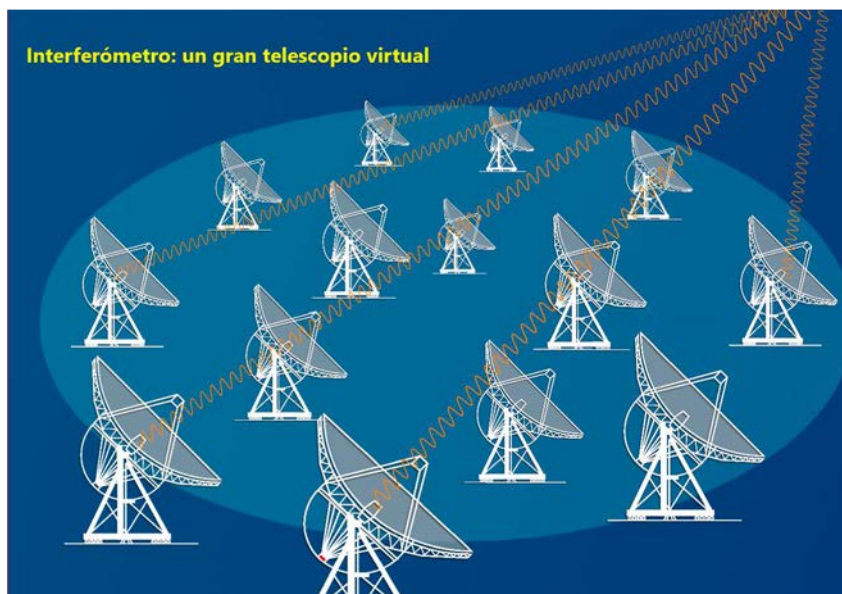
Parábolas coordinadas

Para superar las restricciones de resolución angular impuestas por el

límite de difracción y obtener imágenes más detalladas, se emplea la técnica denominada interferometría, consistente en combinar las señales detectadas por dos o más telescopios que observan simultáneamente, apuntando exactamente a la misma posición en el cielo y exactamente en el mismo instante.

En este caso, la resolución espacial ya no depende del tamaño de los telescopios sino de su separación. Este tipo de instrumen-

Varias antenas pueden combinarse para simular un telescopio tan grande como la máxima separación entre ellas | ESO/NRAO/NAOJ.



tos se denominan interferómetros. Mediante el uso de esta técnica, en ondas radio pueden llegar a alcanzarse resoluciones de unos pocos microsegundos de arco (millonésimas de segundo de arco), obteniéndose así las imágenes de mayor detalle posible de las que pueden conseguirse en cualquier rama de la astronomía.

La radiointerferometría puede realizarse de dos maneras: con los radiotelescopios conectados entre sí mediante fibra óptica en tiempo real (interferometría conectada) o con los radiotelescopios repartidos por lugares muy distantes del planeta (interferometría de muy larga línea de base o VLBI, por sus siglas en inglés). NOEMA es un interferómetro conectado: sus doce antenas están conectadas mediante fibra óptica a un supercomputador que combina las señales en tiempo real para conseguir una imagen similar a la que obtendría una única antena de ¡1,7 km de diámetro! (la máxima separación de las antenas entre sí).

Antenas móviles

Los orígenes de NOEMA se remontan a los últimos años de la década de 1970, cuando comenzó la colaboración entre el Centro Nacional para la Investigación Científica (CNRS) de Francia, la Sociedad Max-Planck-Gesellschaft (MPG) de Alemania y nuestro Instituto Geográfico Nacional, para la creación del Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM).

El objetivo de este instituto era el diseño, la construcción y el funcionamiento de dos grandes observatorios: la estación IRAM-IGN en Pico Veleta, cerca de Granada, con un ambicioso radiotelescopio de 30 m de diámetro, y el interferómetro de tres antenas de 15 m instalado en el Plateau de Bure.



La parábola de cada antena está protegida (forrada) con una estructura que ayuda a mantener su temperatura constante. Al fondo el Pico de Bure | IRAM.

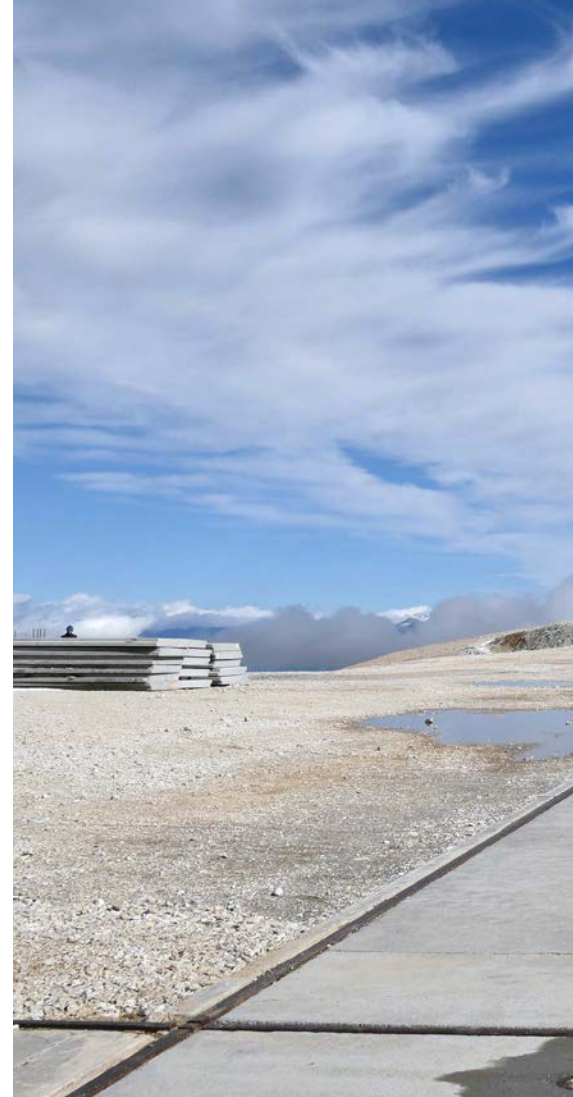
La resolución especial de NOEMA es tan alta que sería capaz de detectar un teléfono móvil a una distancia de más de 500 kilómetros.

Ambos observatorios fueron ideados para ser totalmente complementarios: el radiotelescopio de Pico Veleta permite realizar mapas del cielo de gran campo (incluso panorámicos), mientras que desde el Plateau de Bure se puede enfocar sobre los detalles de cada mapa para estudiar los astros concretos más interesantes.

A la vista de los buenos resultados obtenidos por estos observatorios iniciales, IGN se sumó como miembro de pleno derecho a la colaboración en 1990, y se decidió duplicar el número de antenas de Bure, para pasar de tres a seis. Ya en el año 2014, los tres socios del IRAM decidieron volver a duplicar el número de antenas para llegar a un total de 12. Este es el proyecto que recibió el nombre de NOEMA, abreviatura de Northern Extended

Millimeter Array “Interferómetro extendido de ondas milimétricas del hemisferio norte” y que culmina ahora, consagrandolo al IRAM y con él a sus socios CNRS, MPG e IGN, en líderes mundiales de la astronomía de ondas milimétricas.

Cada antena de NOEMA pesa 120 toneladas y todas son autopropulsables, de forma que pueden moverse a lo largo de unos railes practicados en las pistas construidas para ese efecto en la superficie allanada de la meseta de Bure. Separando progresivamente las antenas se consigue un efecto de zoom cuando se observa un objeto celeste: según están más separadas entre sí, mayor es la resolución angular del instrumento. Inicialmente las pistas por las que se mueven las antenas tenían una longitud máxima de unos 700 m.



Ahora han sido ampliadas para que las puedan alejar entre sí hasta 1,7 km. Las diferentes configuraciones del interferómetro pueden así extenderse desde unos pocos cientos de metros hasta los citados 1,7 km, lo que permite “acercarse” progresivamente al objeto celeste que estamos estudiando para observar hasta sus más finos detalles. Por poner un ejemplo ilustrativo, la resolución espacial máxima de NOEMA es tan alta que haría posible la detección de un teléfono móvil a una distancia de más de 500 km.

Números récord

Esta versatilidad en las configuraciones y líneas de base se suma a la alta sensibilidad de los receptores que han sido construidos con las tecnologías más pioneras para



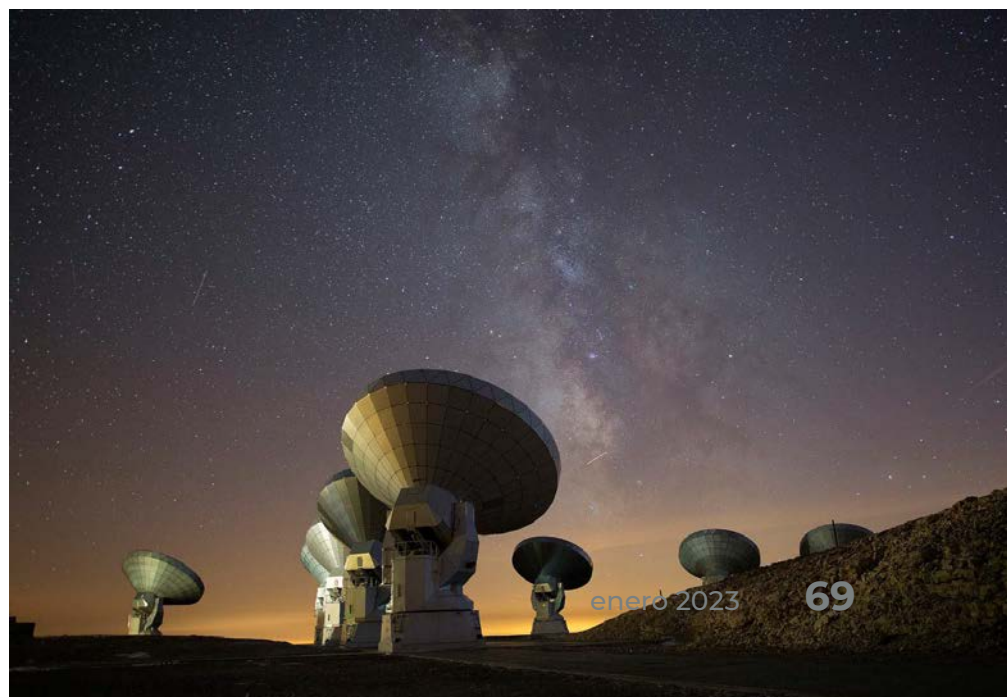
Los raíles sobre los que se mueven las antenas se extienden hasta 1,7 km | IRAM.

poder trabajar a temperaturas de unos 270 grados Celsius bajo cero. Las condiciones criogénicas son necesarias para disminuir, hasta un nivel cuántico (el mínimo físicamente posible), el ruido electrónico producido por los propios receptores, ruido que se superpone a las señales recibidas del cielo y que podría enmascararlas si no se minimizase. Cada receptor cuenta con cuatro sensores basados en tecnologías SIS (superconductor - aislante - superconductor) y centrados en longitudes de ondas de 0,8, 1, 2 y 3 mm. Cada uno permite observar una banda de frecuencias muy ancha: de hasta 32 gigahercios.

Las parábolas de las antenas están constituidas por 176 paneles de una aleación de aluminio que van apoyados sobre una estructura de vigas de fibra de carbono. Las

irregularidades de las parábolas se encuentran entre 25 y 40 micrómetros (milésimas de milímetros), de forma que, como ya se ha dicho, son perfectas al nivel del grosor de un cabello humano. Para evitar que las superficies se deformen,

La Vía Láctea sobre NOEMA | IRAM.



cada parábola va protegida por una estructura cerrada que contiene unos calentadores para que los paneles se mantengan a temperatura constante, esto también evita que se acumule nieve o se forme hielo sobre las parábolas. Además, la posición y orientación de cada panel se puede optimizar gracias a cuatro motores paso a paso.

Las monturas altazimutales de las parábolas permiten apuntar a un astro, y seguirlo en el cielo compensando el movimiento de rotación de la Tierra, con una altísima precisión de 1,5 segundos de arco. La señal recogida en cada superficie parabólica se refleja hacia un espejo secundario colocado en el foco geométrico de la parábola y, desde allí, se envía de vuelta al lugar donde se encuentran los receptores. Esta configuración óptica recibe el nombre de Cassegrain, un homenaje al astrónomo francés Laurent Cassegrain que la ideó en el siglo XVII.

Equipado con estas tecnologías de vanguardia, NOEMA es, además, uno de los pocos observatorios de radio en el mundo que puede llevar a cabo lo que los científicos llaman "observaciones multilínea", es decir, la capacidad de detectar un gran número de firmas molecu-



Un observatorio de difícil acceso

El Pico de Bure es una masa de roca caliza que culmina a 2709 metros en el macizo de Dévoluy, en los Alpes franceses. Se caracteriza por su pilar vertical de 600 metros de altura que domina sobre la estación de esquí de SuperDévoluy. Esta pared oriental es considerada por los montañeros como la escalada más difícil de los macizos calizos de los Alpes franceses. La meseta denominada Plateau de Bure se extiende hacia el oeste del Pico, es una superficie muy llana de poco menos de 2 kilómetros de longitud y unos pocos cientos de metros de ancho. En invierno, las temperaturas pueden descender por debajo de los 30 grados bajo cero. En noches despejadas, la atmósfera sobre el observatorio, con menos de 2 milímetros de vapor de agua, es extremadamente transparente.

El acceso a la meseta de Bure entraña grandes dificultades y ha sido el escenario de dos grandes tragedias. Inicialmente se construyó un teleférico exclusivamente para llegar al Observatorio. El 1 de julio de 1999 un accidente del teleférico ocasionó la muerte de 20 personas, incluyendo varios astrónomos y técnicos del IRAM, y el 15 de diciembre del mismo año un accidente de helicóptero causó otras cinco víctimas. Tras una larga parada, el Observatorio recomenzó sus actividades con el personal accediendo a pie, en esquí o en helicóptero. Más recientemente se ha construido un teleférico moderno con las máximas garantías de seguridad.



lares y atómicas simultáneamente. Estas prestaciones, combinadas las mencionadas sensibilidad y resolución angular, tan altas, hacen de NOEMA un instrumento único para investigar la complejidad de la materia interestelar y los elementos constitutivos del Universo.

NOEMA ofrece a los científicos de instituciones en Francia, Alemania y España el acceso privilegiado a las observaciones en ondas milimétricas, lo que supone una oportunidad para llevar a cabo investigaciones sin precedentes. En total, IRAM presta su apoyo a más de 5000 científicos de todo el mundo para la realización de estudios sobre la materia fría del Universo: esa que se encuentra distribuida



NOEMA puede observar las 24 horas del día. Al fondo y a la izquierda los edificios de control | IRAM.

por la Vía Láctea, y por muchísimas otras galaxias, a tan solo unos pocos grados por encima del cero absoluto.

El poder de resolución y la sensibilidad que consigue NOEMA permiten a los científicos coleccionar luz que ha viajado desde los confines del Universo, durante 13 000 millones de años, antes de llegar a la Tierra. El Observatorio es un lugar excepcional tanto por la transparencia de sus cielos como por toda la alta tecnología que alberga. Con sus tintes futuristas, no es de extrañar que haya servido de telón de fondo a series de ciencia ficción, como la franco-británica “La guerra de los mundos” que fue rodada en 2019.

Galaxias, estrellas, planetas

Las antenas de NOEMA también pueden utilizarse para analizar la formación, composición y dinámica de galaxias completas. Un buen ejemplo de este tipo de observaciones son las de la galaxia espiral de gran diseño conocida como IC342, galaxia que se encuentra a una distancia de unos 10 millones de años luz en la constelación de la Jirafa (Camelopardalis). Como ilustra la primera imagen de la página siguiente NOEMA demuestra que el gas molecular (en azul en la imagen) se encuentra distribuido a lo largo de los brazos espirales y de otros filamentos que, en ocasiones, conectan unos brazos con otros.

Estos filamentos están asociados a brotes de formación estelar, lugares donde la densidad gaseosa se ha hecho suficientemente alta como para formar nuevas estrellas.

Utilizando observaciones de NOEMA y datos de archivo de varios observatorios espaciales y terrestres, también se ha descubierto recientemente un objeto único en el Universo primitivo que proporciona un vínculo crucial entre las galaxias en formación estelar y la aparición de los primeros agujeros negros supermasivos. Se trata del objeto CNz7q, el primer agujero negro de rápido crecimiento que se encuentra en el Universo primitivo. Su luz ha viajado durante 13 100 millones de años antes de llegar a nuestras



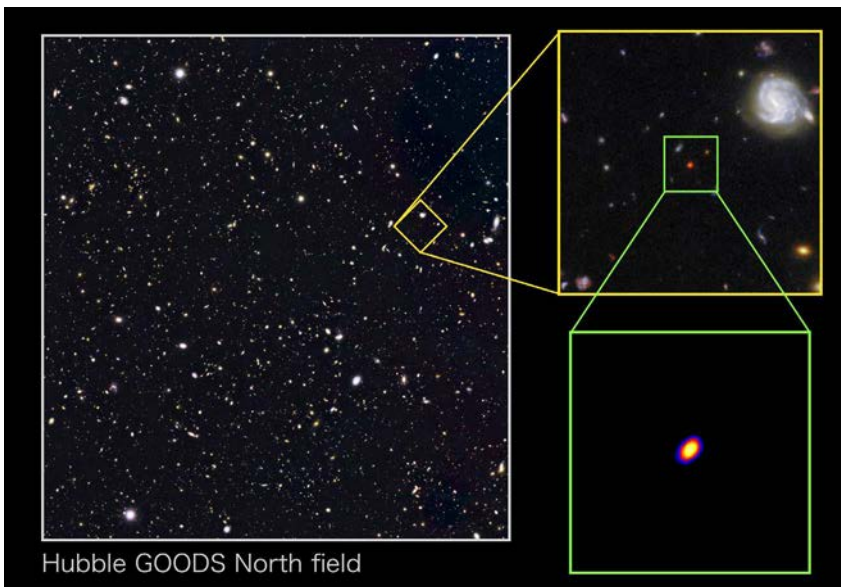
La gran galaxia espiral IC342 observada por NOEMA | IRAM/VLA/DSS2/ Mayall/ A. Schruba.

antenas, proporcionándonos una mirada insólita sobre cómo era el Universo cuando tan solo habían transcurrido 700 000 años después del Big Bang (recordemos que la edad del universo es de 13 800 millones de años). En la imagen adjunta, se muestra una imagen de gran campo tomada por

el telescopio espacial Hubble junto con la imagen tomada por NOEMA gracias a la emisión del monóxido de carbono, imagen esta última que permite determinar la distancia precisa al objeto.

NOEMA también permite estudiar los pequeños discos de gas y polvo que rodean a las estrellas

El objeto CNz7q observado por el Hubble y por NOEMA (abajo a la derecha). Ver texto para detalles | NASA/ESA/HST/IRAM.

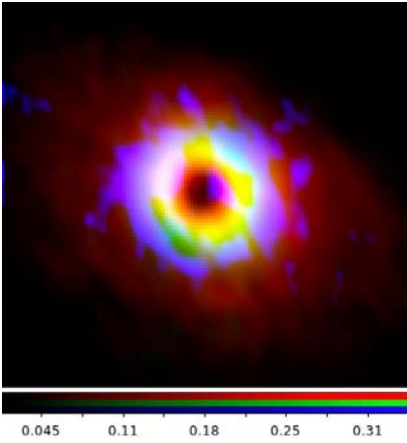


Hubble GOODS North field

jóvenes y en los que se forman los planetas. El gas de estos discos es la materia prima a partir de la cual se formarán las atmósferas planetarias y, en su caso, la vida. El conocimiento detallado de su composición química es una condición indispensable para entender la formación de nuestro sistema solar y la emergencia de la complejidad química.

Un buen ejemplo de este tipo de observaciones lo constituye el disco proto-planetario de la estrella AB Aurigae. En la siguiente figura se muestra la imagen obtenida mediante observaciones en diferentes longitudes de onda. Cada color traza la emisión de una molécula distinta: en rojo y amarillo se representan las emisiones de dos variedades isotópicas del monóxido de carbono: ^{13}CO y C^{18}O , mientras que el color azul representa la del monóxido de azufre, SO . La estructura de este disco (muy estudiada por los astrónomos del Observatorio Astronómico Nacional, IGN) muestra claros indicios de la formación de un sistema planetario. NOEMA nos puede dar las claves de la formación de planetas similares a nuestra Tierra.

Como observatorio de propósito general, el del Plateau de Bure se utiliza para una gran variedad de investigaciones que, además de las ya mencionadas, van dirigidas al estudio de los cometas, las estrellas evolucionadas cuando llegan al final de sus vidas, o el entorno de los agujeros negros, entre muchos otros. La observación de todos estos astros tiene por objetivo último el resolver muchos de los interrogantes más fundamentales planteados por la astronomía de nuestros días. Muy recientemente, con NOEMA se ha medido la temperatura de la radiación cósmica de fondo en una etapa muy temprana



El disco proto-planetario de la estrella AB Aurigae | IRAM/OAN.

del Universo, una primicia mundial que debería ayudar a identificar y restringir mejor los efectos de la energía oscura.

Un telescopio grande como el planeta

Además de actuar como un interferómetro conectado, las antenas de NOEMA también pueden observar coordinadamente con otros radiotelescopios repartidos por todo el mundo para conseguir así, mediante VLBI, imágenes similares a las que obtendría una antena parabólica única tan grande como el planeta Tierra. De esta manera, las antenas de NOEMA vienen participando en el denominado Telescopio del horizonte de sucesos (EHT, por sus siglas en inglés), una colaboración internacional en la que participan radiotelescopios en Hawái, Groenlandia, la Antártida, Chile, México y EE. UU., y a los que también está sumado el magnífico radiotelescopio de 30-m instalado en la estación de observación IRAM-IGN en Pico Veleta, cerca de Granada (conviene notar que, a pesar de sus grandes prestaciones, el radiotelescopio del observatorio de Yebes no trabaja en el rango de longitudes de onda cubiertas por el EHT).

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

El correlador, cerebro de NOEMA

El “cerebro” del interferómetro NOEMA es el correlador: un supercomputador capaz de combinar en tiempo real las señales que, por un tendido de fibra óptica, le llegan desde cada una de las 12 antenas repartidas por la superficie del Plateau de Bure. El correlador es capaz de alinear perfectamente las señales recibidas en cada instante, con una precisión altísima, para combinarlas matemáticamente y así simular la señal que habría recibido un único radiotelescopio virtual tan grande como la máxima separación entre antenas, que puede llegar a 1,7 km.

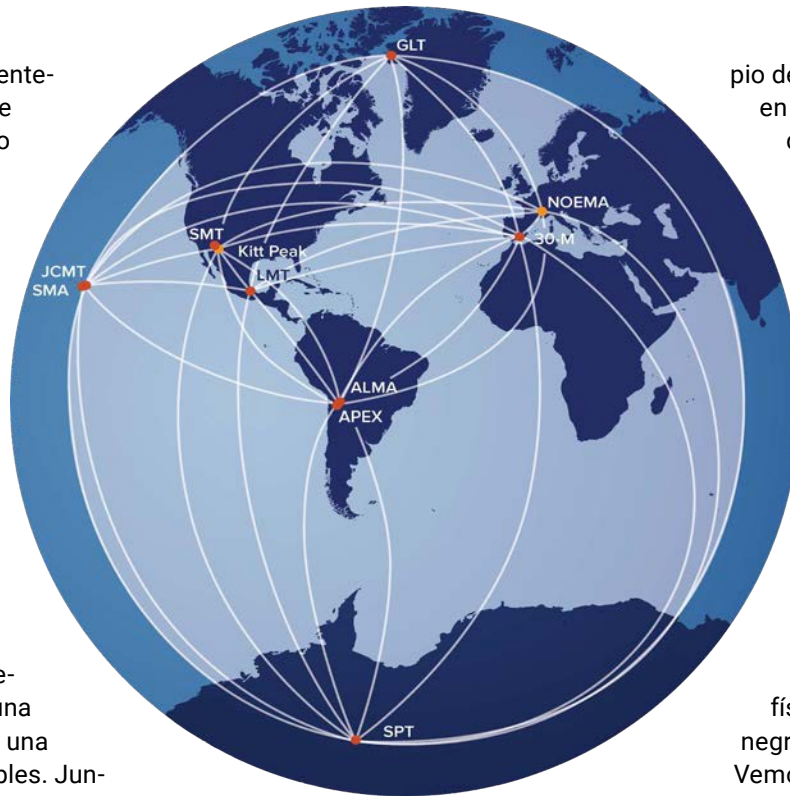
Este correlador permite una gran flexibilidad en las observaciones de espectroscopía, pues es capaz de tratar varias bandas de frecuencia con una resolución espectral ajustable. Puede proporcionar hasta 128 000 canales espectrales. Esto hace posible la observación de las emisiones de varias especies moleculares de manera simultánea, lo que multiplica la eficiencia del observatorio.

NOEMA puede funcionar las 24 horas del día y los 365 días del año. Las observaciones, propuestas por astrónomos de todo el mundo, las realiza un equipo técnico de IRAM que, a continuación distribuye los datos a los astrónomos que los solicitaron para su análisis astrofísico.



El correlador de NOEMA | IRAM.

Los radiotelescopios que componen el EHT.



Messier 87. Más recientemente, a principios de 2022, se ha publicado la imagen de Sagitario A*, el agujero negro situado en el centro de la Vía Láctea. NOEMA realizó sus primeras observaciones para el consorcio en 2021 y ha seguido realizando otras en 2022. Con sus 12 antenas extremadamente sensibles, proporciona al interferómetro global EHT una resolución espacial y una sensibilidad inigualables. Junto con el segundo observatorio de IRAM, el mencionado radiotelesco-

pio de 30 metros ubicado en Pico Veleta, cerca de Granada, NOEMA permitirá al EHT producir auténticas “películas” que permitan ver la evolución de estos agujeros negros con altísimo detalle. Ambas instalaciones del IRAM son de importancia crítica para la colaboración EHT, y para el estudio y la comprensión de la física de los agujeros negros.

Vemos pues cómo

NOEMA ya ha hecho grandes descubrimientos y ha realizado algunos de los hallazgos más sensacionales de la astrofísica contemporánea. La incorporación de la duodécima antena a finales de septiembre 2022 constituye un hito de primera importancia para el futuro de la radioastronomía de ondas milimétricas. Con el gran interferómetro de ondas milimétricas y submilimétricas de Atacama (ALMA), que está instalado en los Andes chilenos, cubriendo el hemisferio sur y NOEMA cubriendo el hemisferio norte, es de esperar que la radioastronomía de ondas milimétricas nos siga proporcionando muchos hallazgos de primera línea durante las próximas décadas. Para los astrónomos españoles, y concretamente para los que trabajamos en IGN, es un privilegio poder contar con el acceso a estas dos grandes instalaciones científicas que, sin lugar a dudas, van a continuar revolucionando el estudio del universo durante los años próximos. ■

NOEMA es miembro de la colaboración internacional Event Horizon Telescope (EHT) que produjo las primeras imágenes de agujeros negros.

La sombra de los agujeros negros en la galaxia M87 (izquierda) y en la Vía Láctea, observaciones del EHT | EHT.

