



► Imagen del agujero negro obtenida por el «Telescopio Horizonte de Sucesos»

# Descubriendo a Einstein en la galaxia M87

El IGN participa en el proyecto internacional  
«Telescopio Horizonte de Sucesos»  
que capta la primera imagen de un agujero negro

Uno de los secretos hasta ahora mejor guardados del universo, la imagen de un agujero negro, ya ha dejado de serlo. La obtención de esta imagen, que es ya histórica y corrobora algunos de los enunciados de Einstein en su teoría general de la relatividad, ha sido posible gracias a un arduo trabajo de investigación en el que, durante varios años, han participado más de 200 científicos y ocho radiotelescopios distribuidos por todo nuestro planeta, entre ellos el situado en Pico Veleta (Granada), perteneciente al Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM) y gestionado por Alemania, Francia y España, con participación del Ministerio de Fomento a través del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

**El Telescopio Horizonte** de Sucesos (EHT, por sus siglas en inglés) es un ambicioso proyecto de cooperación internacional en el ámbito de la radioastronomía en el que intervienen los mayores radiotelescopios de todo el mundo de los que operan en ondas milimétricas, entre ellos el radiotelescopio de 30 m situado en Pico Veleta (Granada), uno de los dos pertenecientes al IRAM (Instituto de Radioastronomía Milimétrica), un instituto de inves-

tigación hispano-franco-alemán, en el que participa nuestro país a través del Instituto Geográfico Nacional (IGN), adscrito al Ministerio de Fomento.

El proyecto comenzó a gestarse en los primeros años de esta década con el objetivo de estudiar y obtener las primeras evidencias de la existencia de un fenómeno sobre el que la ciencia largamente ha teorizado en este último siglo –desde Einstein a Stephen Hawking– pero del que nunca antes se había logrado ninguna prueba material: los agujeros negros. Y es que, como el Minotauro o el Yeti, estos monstruos del universo que se alojan en los núcleos de todas las galaxias no dejaban de ser predicciones teóricas antes que objetos reales y observables de la naturaleza.

## Confirmando a Einstein

Para poner fin, precisamente, a la falta de tanta certeza y confirmar también la teoría general de la relatividad de Albert Einstein, cerca de 200 científicos de todo el mundo –astrónomos, matemáticos, ingenieros– pusieron en marcha el proyecto Telescopio Horizonte de Sucesos (EHT), un telescopio a escala planetaria que combina en la actualidad el poder de observación de los mayores radiotelescopios de ondas milimétricas distribuidos en distintos puntos del planeta, cuya coordinación hace de todos ellos un telescopio virtual gigante del tamaño de la Tierra. Así, además del radiotelescopio del IRAM en Pico Veleta, en el EHT han participado también radiotelescopios del Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) y del Atacama Pathfinder



Experiment (APEX), situados en Chile; el gran telescopio milimétrico Alfonso Serrano, en México; el James Clerk Maxwell y el Submilimeter Array, ambos en Hawái (Estados Unidos); el Submilimeter Telescope de Arizona (Estados Unidos), y el South Pole Telescope de la Antártida.

Una técnica, cada vez más utilizada y desarrollada por la radioastronomía, que está permitiendo observar y reconocer los objetos más alejados de nuestro sistema solar, conocida como Interferometría de Muy Larga Base (VLBI, por sus siglas en inglés), es la que se ha empleado también en el proyecto EHT. Gracias a ella y a la ayuda de potentes herramientas y programas de computación, se pudieron procesar y combinar las señales (radiaciones de ondas milimétricas) llegadas a los distintos radiotelescopios como si se tratara de una única señal, captada por un solo radiotelescopio virtual, si bien este de tamaño equivalente a la máxima distancia de separación entre todos ellos y con un poder de resolución también equivalente a esa superficie. Así, y por utilizar el ejemplo más extendido, para dar una idea de la capacidad del Telescopio EHT: situándolo en Madrid, los observadores podrían leer un libro o un periódico en el otro lado del Atlántico, en la ciudad de Nueva York.

Pero el objetivo del EHT era en este caso algo más complejo: el agujero negro supermasivo fuera de

la Vía Láctea más próximo a la Tierra, el que está localizado en el centro de una de las galaxias gigantes más próximas, la Virgo A, también conocida como Messier 87 y, más técnicamente, M87. Se trata de una galaxia elíptica brillante, con unas características que la hacen muy accesible para el estudio tanto por parte de astrónomos aficionados como científicos. Gran emisora de rayos gamma, los estudiosos tenían la sospecha desde hacía tiempo de que su núcleo acoge un agujero negro supermasivo, mucho más masivo que el que puebla el centro de nuestra Vía Láctea (el bautizado como Sagitario A\*, o simplemente Sgr A\*), el primer agujero negro supermasivo estudiado por los astrónomos.

Las primeras hipótesis sobre la existencia de Sgr A\* se lanzaron en 1971, y los astrónomos Bruce Balick y Robert Brown del National Radio Astronomy Observatory de EE UU fueron los primeros investigadores que lograron indicios fiables de su naturaleza como agujero negro. En años posteriores y estudiando los movimientos de las estrellas más cercanas que orbitan en torno a este gigantesco agujero, se estimó que su masa podría ser equivalente a unos cuatro millones de masas como la del Sol. Recordemos que marca el mismísimo centro de nuestra galaxia y está situado a unos 27.000 años luz de nuestro sistema solar (un año luz equivale aproximadamente a 9,46 billones de km).

► Observatorio del IGN en Yeves (Guadalajara).





► Fotomontaje recreando la imagen del agujero negro y radiotelescopio del IRAM en Pico Veleta.

### Plantel español en el EHT

España es una gran potencia en radioastronomía, bajo sus cielos están instaladas dos antenas parabólicas de entre las más potentes del mundo: la del Instituto Geográfico Nacional (IGN) en el Observatorio de Yebes (Guadalajara) y la de Pico Veleta (Granada), esta última fruto de la colaboración entre el CNRS francés, la Sociedad Max-Planck alemana y el propio IGN. Además, su comunidad de radioastrónomos repartida entre el IGN, el CSIC y varias universidades es de las más dinámicas de Europa, colaborando muy significativamente en otros grandes observatorios como el de ALMA en Atacama (Chile) y el del IRAM en los Alpes franceses. Parte de la instrumentación utilizada en ALMA, en Pico Veleta y en otros radiotelescopios de la red ha sido diseñada y construida en el Observatorio de Yebes (IGN). No es por tanto de extrañar que España haya jugado un papel muy significativo, a todos los niveles, en este proyecto.

Así, en el proyecto EHT ha participado un nutrido equipo de astrónomos y científicos españoles. Por parte del IGN, junto a Iván Martí-Vidal, responsable en el desarrollo de los algoritmos que permitieron combinar los datos de ALMA (el elemento más potente del EHT) con el resto de radiotelescopios y que ha estado también al frente de la coordinación del grupo de polarimetría (cuyo principal objetivo es estudiar el papel de los campos magnéticos en las proximidades del agujero negro), han participado asimismo desde el IRAM su director de la estación de Pico Veleta, Miguel Sánchez- Portal, los ingenieros Salvador Sánchez e Ignacio Ruiz, y los astrónomos Pablo Torné y Rebecca Azulay (Universidad de Valencia).

Otros científicos españoles participantes, en este caso por parte del CSIC y de su Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), han sido el astrónomo José Luis Gómez, que ha desempeñado una labor crucial al coordinar el artículo para *The Astrophysical Journal Letters*, donde se da cuenta de parte de los trabajos, junto a Antxon Alberdi, director del IAA.



► Observatorio del IRAM en Pico Veleta.

## En busca de agujeros negros

A partir de esos datos, en 2007, un equipo de astrónomos norteamericanos encabezado por Sheperd Doeleman, uno de los grandes impulsores del proyecto EHT, pudo observar la estructura de gases alrededor de Sgr A\*. Utilizaron para ello interferometría de muy larga base (VLBI) con la ayuda de tres radiotelescopios en Arizona, California y Hawái, sincronizados como si se tratara de uno solo pero con el poder de resolución de la máxima distancia de separación entre ellos. Vieron que esa estructura de gases podía estar localizada muy cerca del llamado horizonte de sucesos del Sgr A\*.

De manera muy simplificada, en astronomía se conoce como horizonte de sucesos a la superficie imaginaria que rodea a un agujero negro, una especie de divisoria o frontera que separa su enorme masa del exterior, y se ha teorizado que todo cuanto la traspasa y cae dentro del agujero negro, debido a la extrema intensidad de su campo de gravedad, no podría ya regresar jamás al exterior pues, para ello, necesitaría alcanzar una velocidad superior a la de la luz, algo que es físicamente imposible.

Aunque ya con anterioridad los científicos habían especulado sobre la existencia de los agujeros negros desde el siglo XVIII, fue Einstein quien, a partir de su teoría de la relatividad y del comportamiento de las ondas de la luz sometidas a la influencia de un campo gravitacional, comenzó a desvelar sus principales características, si bien nunca pudo comprender en toda

su complejidad el fenómeno. Fue durante la Primera Guerra Mundial cuando otro matemático y físico alemán, Karl Schwarzschild, a partir de algunas de las formulaciones de Einstein, predijo la existencia de un perímetro crítico en torno a un punto en el que se condensa una enorme cantidad de materia, más allá del cual la luz ya no puede escapar. A ese umbral crítico le puso el nombre de «radio de Schwarzschild», que

luego más adelante sería ya conocido como horizonte de sucesos. Muchos años después, ya a finales de la década de los 60, Stephen Hawking y Roger Penrose, a partir de las ecuaciones

de Einstein, avanzarían en la descripción de las «estrellas en colapso gravitatorio completo», a las que John Wheeler pondría el definitivo nombre de «agujero negro», desde entonces uno de los objetos del universo más sólidamente descrito por la teoría pero del que apenas había el menor rastro de su apariencia física.

---

**Los agujeros negros, descritos profusamente por la teoría, han cobrado apariencia física gracias a la foto del EHT**

---

## Imagen histórica

Hasta la fotografía obtenida gracias al telescopio EHT, cuya imagen del agujero negro masivo situado en el centro de la galaxia M87, comenzó a dar la vuelta al mundo en abril del presente año. «La resolución y calidad de las imágenes obtenidas de la sombra de este agujero negro son verdaderamente excepcionales», comenta Iván Martí Vidal, uno de los científicos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) que ha participado en el proyecto EHT elaborando los sistemas de cálculo que han



► Dos imágenes del Observatorio Astronómico del IGN en Yebes (Guadalajara).

permitido combinar los datos obtenidos desde el radiotelescopio ALMA con los del resto de la red EHT.

Pero obtener esas primeras imágenes no ha sido tarea fácil. Durante años hubo una intensa campaña de calibración de los radiotelescopios, de modernización y actualización de sus equipos para que pudieran trabajar sincronizados con relojes atómicos de la máxima precisión, de ensayos para captar las señales y ajustar los programas informáticos para depurarlas y evitar errores en los procesos posteriores, de convertirlas en algoritmos precisos, de cribar y procesar datos y más datos, de corregir las distorsiones causadas en las señales por minúsculas partículas en la ionosfera o en la

atmósfera terrestre... una tarea paciente y rutinaria que ha exigido el esfuerzo y la concentración de un muy bien organizado ejército multidisciplinar de más de 200 científicos –matemáticos, físicos, astrónomos, ingenieros, informáticos– repartidos por cuatro continentes.

Toda esa colosal tarea previa «de afinado de instrumentos e intérpretes», como la ha calificado uno de los científicos participantes, hizo posible que ya en 2017 el radiotelescopio virtual del proyecto EHT alcanzara una resolución de 20 microsegundos de arco, una de las máximas logradas nunca en observaciones VLBI, y se lanzara a explorar el corazón de la galaxia M87. En abril de ese año, a lo largo de cuatro intensas jornadas, el agujero negro pudo ser ya observado con la sincronización de los ocho radiotelescopios, y los distintos centros de seguimiento obtuvieron cerca de cuatro petabytes de datos (los archivos de internet ocupan unos 10 petabytes) que fueron posteriormente procesados por los equipos al frente de las supercomputadoras emplazadas en Haystack (Estados Unidos) y Bonn (Alemania).

En los meses siguientes la cosecha de datos empezó a dar sus primeros frutos, de modo que ya antes del verano del año pasado los científicos del proyecto EHT tenían en sus manos las primeras fotos del agujero negro. Por prudencia, no llegaron a hacerse públicas entonces. Solo circularon en congresos de especialistas a puerta cerrada, en ám-



## La interferometría que hizo posible la imagen del M87

La radioastronomía es una ciencia relativamente reciente que se basa en la captación de las ondas de radio (radiaciones electromagnéticas) emitidas por los objetos celestes. A diferencia de la astronomía tradicional, basada en observaciones mediante telescopios de lentes o espejos que permiten el análisis de esos objetos gracias al estudio de su espectro óptico, la radioastronomía se apoya en la captación de su espectro electromagnético mediante receptores o antenas parabólicas que, equipadas con los procesadores adecuados, pueden restaurar las señales de radio emitidas por objetos incluso en los confines del universo conocido.

A finales de los 40 del pasado siglo se comenzó a estudiar la posibilidad de incrementar el poder de resolución de las señales captadas en tierra combinando las recibidas por varios radiotelescopios trabajando sincronizados y observando el mismo objeto, aunque separados entre sí. Se vio que esa resolución podía ser mayor cuanto mayor era la distancia de separación entre ellos. Nació así la interferometría de muy larga base (VLBI), que comenzó a cobrar un notorio desarrollo ya en la década de los 70, técnica a la que nuestro país empezó a contribuir hace ya cuatro décadas, en 1979, con la construcción de un primer radiotelescopio en el Observatorio Astronómico de Yebes (Guadalajara) a cargo del IGN.

Gracias a la interferometría, la radioastronomía posee hoy un enorme potencial para estudiar incluso galaxias y estrellas muy alejadas de nuestro sistema solar, pudiendo ayudar a esclarecer fenómenos que no son observables en otras longitudes de onda. Gracias a que la velocidad de la luz está limitada a 300.000 km/s, el tiempo que tarda en viajar desde un astro hasta nosotros puede ser muy grande, lo que también hace que los objetos detectados en los confines del universo se nos muestren tal como eran hace mucho tiempo. Es decir, esto nos permite ver el universo tal y como era en sus etapas más tempranas. Las posibilidades que ha abierto la interferometría a la astronomía son, pues, enormes, y el radiotelescopio del proyecto EHT es la mejor muestra de ello.

bits muy restringidos. «Era una cuestión de amarrar muy bien toda la información obtenida, de seguir contrastándola y no avanzar nada hasta que todos los análisis estuvieran sólidamente confirmados», explica Rafael Bachiller, director del Observatorio Astronómico Nacional (OAN), adscrito al IGN.

## Una imagen, mil ecuaciones

Antes de dar a conocer la imagen que ya ha dado la vuelta al mundo, los científicos del EHT produjeron cerca de 70.000 imágenes. «Aunque todas tenían similitudes, finalmente se escogió esa porque era la más consistente y fiable, la que mejor repre-

► Grupo de antenas del proyecto ALMA en el desierto de Atacama.





► Observatorio del IRAM en Pico Veleta con su antena de 30 m en primer término.

sentaba la sombra de este agujero negro. Además las propiedades del agujero negro que muestra esta imagen concuerdan totalmente con la información que se conocía previamente de M87 a través de otras observaciones», añade Pablo de Vicente, director del Observatorio de Yebes (IGN). Por supuesto, el agujero negro supermasivo de la Vía Láctea, Sgr A\*, también está siendo observado por el EHT y, aunque no se haya obtenido aún una imagen tan clara como la de M87, se espera poder conseguirlo durante las próximas campañas de observación.

Los científicos, que llevan examinando estos datos ya al menos un par de años, y que también siguen estudiando todo cuanto ocurre en torno al agujero negro, están también de acuerdo en que, más allá de la excepcionalidad de esas primeras imágenes, su verdadero valor es que la astrofísica sigue confirmando, punto por punto y de manera práctica, la teoría general de la relatividad de Albert Einstein. La imagen del agujero negro en M87, en apariencia tan simple como un círculo central muy oscuro recortado sobre un fondo brillante, viene a revelar algo que el científico alemán ya anticipaba en sus cálculos, y también algo en lo que desconfiaba y se resistía a creer: que la fuerza de

la gravedad podía llegar a ser tan poderosa como para deformar de manera extrema el espacio y el tiempo. Por utilizar un ejemplo cercano: si se somete un colchón a una presión leve solo se aprecia la pequeña deformidad del hundimiento; pero si esa presión se eleva a varios millones de atmósferas, la energía de fricción cambia de tal manera la estructura y la materia del colchón que su esencia es ya otra al traspasar el umbral de no retorno al estado anterior.

Por otro lado, esa imagen tiene también otro valor añadido importantísimo, este de unas dimensiones tan descomunales, quizás, como las de la galaxia M87: los enormes beneficios que conlleva la colaboración a escala internacional. «Creo que esta imagen de M87 es un magnífico ejemplo de lo que la ciencia puede lograr superando fronteras, cooperando y no incurriendo en egoístas carreras auspiciadas por comunidades cerradas sobre sí mismas o nacionalismos. Ese es el agujero negro que el proyecto EHT ha superado y, gracias a ello, el EHT viene a ilustrar lo que se puede obtener gracias a la colaboración científica a escala internacional», concluye Rafael Bachiller.

Antonio Recuero/Fotos: IGN