

# FOTOGRAFIANDO SgrA\* CON EL EHT

El 10 de abril de 2019 la colaboración del Telescopio Horizonte de Sucesos (EHT por sus siglas en inglés) revelaba la primera imagen de un agujero negro, el situado en el corazón de la galaxia M87. Más recientemente, el EHT ha conseguido obtener la primera imagen directa del agujero negro en el centro de nuestra galaxia, conocido como SgrA\*, mostrada en la Fig. 1. Con estas imágenes los agujeros negros han pasado de ser una solución a las ecuaciones de la Relatividad General, a ser objetos reales que podemos estudiar a través de repetidas observaciones astronómicas.



José Luís Gómez  
Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC  
[jlgoomez@iaa.es](mailto:jlgoomez@iaa.es)

Los agujeros negros son a la vez los objetos más exóticos y simples que predice la teoría de la relatividad de Einstein. En ellos la curvatura del espacio-tiempo es tan intensa que llegan a producir un “agujero” en el propio Universo. Este “agujero”, o singularidad, está rodeado por el horizonte de sucesos, de donde ni siquiera la luz puede escapar, lo que convierte a los agujeros negros en objetos teóricamente “invisibles”, o negros. El horizonte de sucesos es por tanto una puerta de salida sin retorno de nuestro universo. Nada impide que crucemos el horizonte de sucesos, pero no podríamos volver para contar lo que hemos visto. Fotografiar agujeros negros es por tanto una labor complicada, ya que solo podemos distinguir su silueta delineada por el anillo de luz aumentado, correspondiente a la última órbita inestable de los fotones alrededor del horizonte de sucesos.

El tamaño de un agujero negro es proporcional a su masa, y por tanto el tamaño aparente en el cielo viene dado por la razón entre su masa y la distancia a la que se encuentra. Aunque los agujeros negros en M87\* y SgrA\* son super masivos, con masas 6.5 miles de millones de veces mayor que la del Sol en M87\* y 4 millones de veces mayor en SgrA\*, el tamaño aparente de estos agujeros negros en el cielo es tan solo de unos 40 y 50 microsegundos de arco, respectivamente, lo que equivale al tamaño de una rosquilla en la Luna. Fotografiar estos agujeros negros requiere un telescopio con una resolución angular sin precedentes en Astronomía, del orden de unos 20 microsegundos de arco o menor. Además es necesario observar a una longitud de onda lo suficientemente corta como para que la emisión que rodea al horizonte de sucesos sea ópticamente delgada.

Necesitamos por tanto un telescopio tan grande como la Tierra para alcanzar esta resolución angular, algo que solo es factible obtener gracias a la técnica de interferometría de muy larga base (VLBI por sus siglas en inglés). El EHT es un conjunto de antenas repartidas por toda la superficie terrestre operando a longitudes de onda milimétricas. Gracias a la técnica de VLBI, el EHT es capaz de sintetizar un telescopio virtual tan grande como toda la Tierra, con lo que es posible alcanzar resoluciones angulares del orden de unos 20

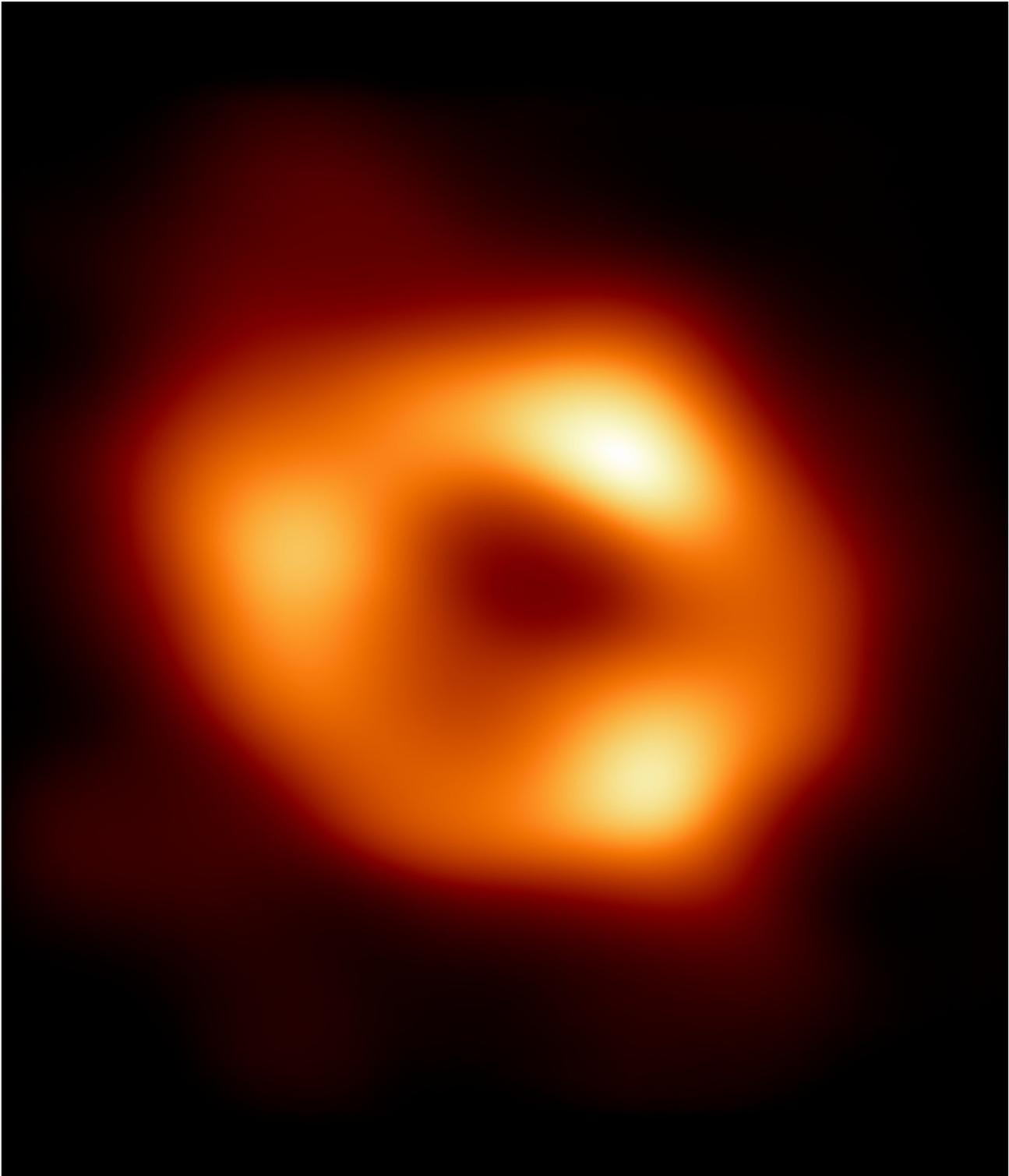


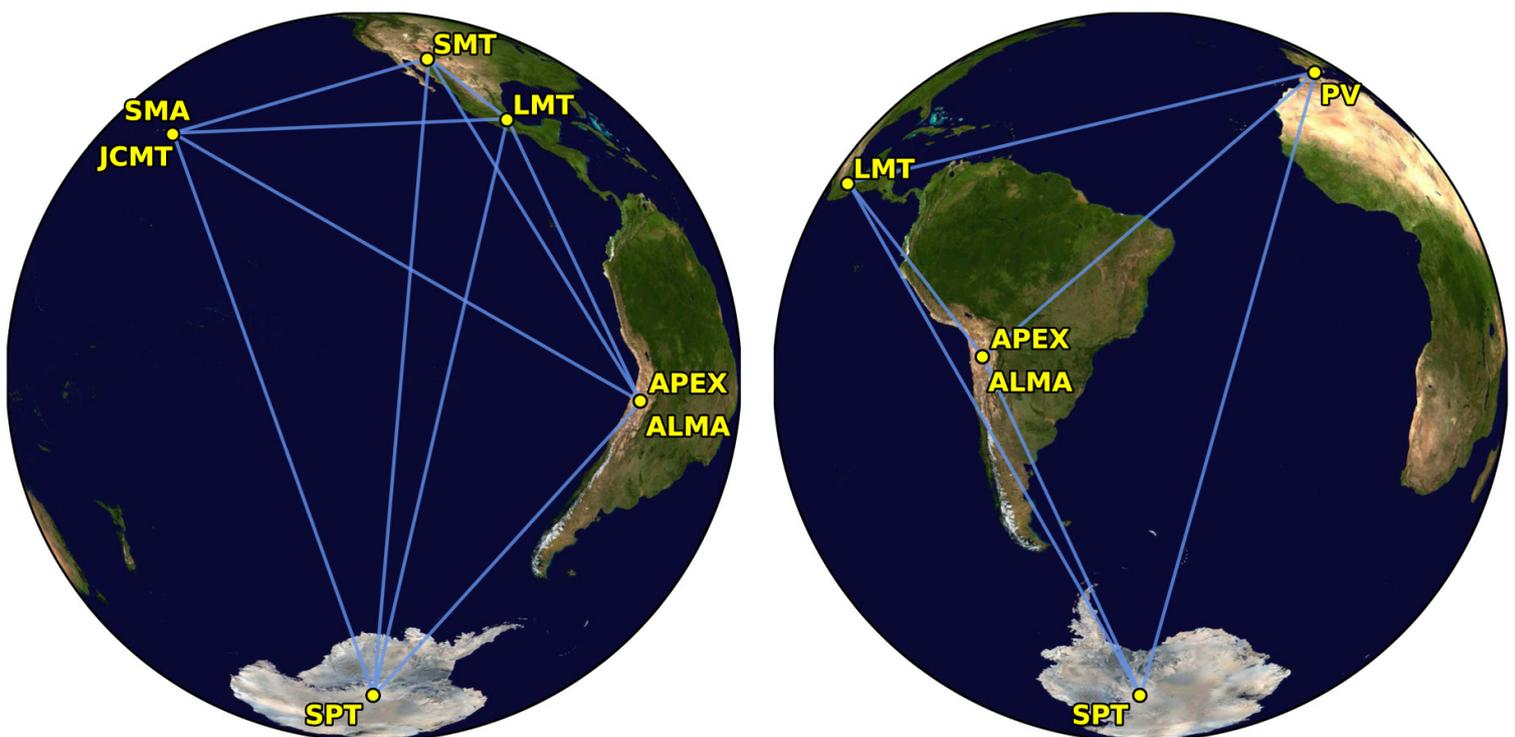
Figura 1. Primera imagen de SgrA\*, el agujero negro super masivo en el centro de nuestra galaxia, obtenida con el Telescopio Horizonte de Sucesos. Reproducida de The Event Horizon Telescope Collaboration et al. 2022, ApJL, 930, L14. Esta es la primera evidencia visual de la existencia de este agujero negro.

microsegundos de arco. Las observaciones del EHT suponen la culminación de años de desarrollo instrumental por parte de numerosas instituciones repartidas por todo el mundo que engloba a los más de 300 investigadores que forman la colaboración del EHT.

El EHT no funciona como los otros telescopios. Cada par de antenas que forman el EHT proporciona un patrón de interferencia, o un valor de las visibilidades. La imagen final del interferómetro corresponde a la transformada de Fourier de las visibilidades obtenidas. Telescopios relativa-

mente cercanos muestrean las bajas frecuencias espaciales, mientras que telescopios separados por grandes distancias proporcionan las altas frecuencias espaciales que nos permiten distinguir los detalles más finos en la imagen. A medida que la tierra rota, la separación y la orientación entre los telescopios cambia, proporcionando información extra. Observando durante toda una noche, los ocho radio telescopios que forman el EHT acumulan la información suficiente para obtener una imagen, haciendo del EHT el único instrumento que tenemos capaz de fotografiar agujeros negros super masivos, como SgrA\* o M87\*.

Figura 2. El conjunto de radio telescopios de EHT 2017 constituido para la observación de Sgr A\*. El conjunto incluía ocho observatorios en seis ubicaciones: el Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) y el Atacama Pathfinder Experiment (APEX) en el Llano de Chajnantor en Chile, el Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano (LMT) en el Volcán Sierra Negra en México, el Telescopio James Clerk Maxwell (JCMT) y el Submillimeter Array (SMA) en Maunakea en Hawái, el telescopio de 30 m del Institut de Radioastronomie Millimétrique (PV) en Pico Veleta en España, el Telescopio Submilimétrico (SMT) en Mt. Graham en Arizona y el Telescopio del Polo Sur (SPT) en la Antártida. Créditos: The Event Horizon Telescope Collaboration et al. 2022, ApJL, 930, L12.



Sin embargo, obtener la imagen del agujero negro en SgrA\* ha sido significativamente más complicado de lo que fue para M87\*. La razón principal es que el tamaño del agujero negro en SgrA\* es mucho menor que en M87\*. El horizonte de sucesos de un agujero negro se ve delimitado por el plasma que gira a su alrededor a una velocidad cercana a la de la luz. Pero mientras que en M87 tarda días o semanas en completar una órbita, en el caso de SgrA\*, más de mil veces más pequeño, tarda tan solo unos minutos en girar alrededor del agujero negro. Por tanto, mientras el EHT estaba tomando datos durante toda una noche la imagen del agujero negro en SgrA\* cambiaba en tan solo minutos. Fotografiar SgrA\* con el EHT es como intentar hacerle una foto de noche a un niño corriendo, mientras que fotografiar M87\* se parece más a hacerle una foto de día a un adulto que posa para la imagen.

Años de estudio nos han permitido diseñar nuevos algoritmos capaces de contrarrestar el movimiento rápido del gas alrededor de SgrA\*. El análisis de los datos de SgrA\*, y el estudio de millones de imágenes de agujeros negros generadas con simulaciones magnetohidrodinámicas relativistas (GRMHD, por sus siglas en inglés), nos ha permitido establecer cuál es el efecto concreto de esta variabilidad en los datos obtenidos con el EHT. En particular, cómo esperamos que varíen las visibilidades obtenidas en función de la distancia que separa a cada par de telescopios, y englobar esta variabilidad como un término extra de error en los datos.

Hemos realizado literalmente decenas de millones de imágenes con datos simulados para refinar nuestros algoritmos de reconstrucción de imágenes interferométricas, así como el modelo de variabilidad de SgrA\*. Una vez estaba todo listo, hemos hecho miles de imágenes de SgrA\* con los mismos parámetros que nos han permitido reproducir los datos simulados.

Cada una de estas imágenes es ligeramente distinta, pero la inmensa mayoría muestra el anillo de luz característico de un agujero negro con ligeras variaciones en la distribución de brillo a lo largo del mismo. La imagen final (Fig. 1) es un promedio de estas imágenes, revelando el gigante que se encuentra en el centro de nuestra galaxia.

Según la Teoría de la Relatividad de Einstein, el tamaño que vemos del agujero negro viene dado únicamente por su masa, y en mucha menor medida por cómo de rápido rota (su spin). Estudios previos, merecedores del Premio Nobel de Física en 2020, nos han permitido determinar con una gran precisión la masa de SgrA\*, por lo que sabíamos muy bien (mucho mejor que para M87\*) qué tamaño debía tener SgrA\*. El anillo de luz en la imagen del EHT tiene un tamaño de exactamente 52 microsegundos de arco, en perfecta concordancia con la Teoría de la Relatividad. SgrA\* tiene un tamaño unas mill veces menor que M87, y aún así los dos agujeros negros son exactamente iguales, y solo cambia su tamaño. Por primera vez confirmamos esta propiedad fundamental de la Teoría de la Relatividad.

La comparación de la imagen de SgrA\* con millones de modelos GRMHD, así como con observaciones a otras longitudes de onda nos han permitido acotar también algunas de las propiedades del agujero negro en el centro de nuestra galaxia. Nuestras observaciones sugieren que estamos viendo el agujero negro con una inclinación menor de unos 50 grados; es decir, el spin de SgrA\* no es perpendicular al plano galáctico. Además nuestras observaciones favorecen modelos en los que el agujero negro rota rápidamente, con un disco de acrecimiento que rota en el mismo sentido y cuya dinámica está dominada por campos magnéticos intensos.

Con las primeras imágenes de los agujeros negros en M87\* y SgrA\* el EHT ha demostrado que es posible estudiar estos objetos con repetidas observaciones astronómicas, comenzando una nueva era en el estudio de los agujeros negros. El EHT se encuentra en continua expansión. Tres nuevas antenas se han añadido al EHT desde estas primeras observaciones en 2017. Observaciones a longitudes de onda incluso menores nos permitirán mejorar aún más la resolución angular para obtener imágenes más nítidas y poner a prueba la teoría de la relatividad con tests cada vez más precisos. Observaciones continuadas de M87\* nos permitirán realizar las primeras películas de agujeros negros para entender cómo es posible extraer energía de los agujeros negros y formar los gigantes jets que emanan de sus cercanías y se extienden más allá del tamaño de la galaxia que los contienen, como ocurre en M87\*.