

Sagitario A*: el agujero negro en el corazón de la Vía Láctea

AÑOS DE INTENSAS OBSERVACIONES HAN PERMITIDO ASEGURAR QUE SAGITARIO A* ES UN AGUJERO NEGRO SUPERMASIVO

Por Rainer Schödel (IAA-CSIC)

Traducción: Silbia López de Lacalle

A MITAD DEL SIGLO XX, Y EN GRAN PARTE GRACIAS AL DESARROLLO DE LAS TÉCNICAS DE RADAR durante la Segunda Guerra Mundial, el enorme progreso en radiotecnología asfaltó el camino para un rápido avance de la radioastronomía. Esta nueva rama observacional de la astronomía pronto desveló numerosas y potentes radiofuentes extragalácticas. Al compararlas con las imágenes de los telescopios ópticos, algunas de ellas se revelaron como objetos muy compactos, muchas veces puntuales y que parecían estrellas normales. Se los denominó cuásares -fuentes de radio cuasi-estelares-, y constituyeron un misterio durante décadas. Su alto corrimiento al rojo muestra que se hallan a distancias cosmológicas y las sitúa entre los objetos más brillantes del Universo (casi ninguno de ellos se halla en el Universo local).

Observar un objeto que se encuentra a semejante distancia supone indagar en el pasado, debido al tiempo que su luz ha tardado en alcanzarnos. Así, los cuásares fueron frecuentes en el Universo temprano pero han desaparecido en gran parte con su evolución hacia su estado actual. Hemos realizado importantes avances en la comprensión de los cuásares, sobre todo gracias a la mejora de las técnicas de observación, como la creación de telescopios mayores y, sobre todo, gracias al Telescopio Espacial Hubble, que permitió ubicar los cuásares en los centros galácticos; un descubrimiento particularmente difícil porque los cuásares son tan brillantes que pueden eclipsar la luz difusa de la galaxia anfitriona.

En la década de 1980 los astrofísicos desarrollaron un modelo que explicaba de manera satisfactoria todas las propiedades de los cuásares observados. Según este modelo, un cuásar es un objeto que obtiene su energía de un agujero negro supermasivo. El término supermasivo se refiere a millones, o incluso miles de millones, de masas solares, en contraste con la media de diez masas solares que presentan los agujeros negros formados por la muerte de las estrellas más masivas. La intensa radiación electro magnética de los cuásares se produce en los

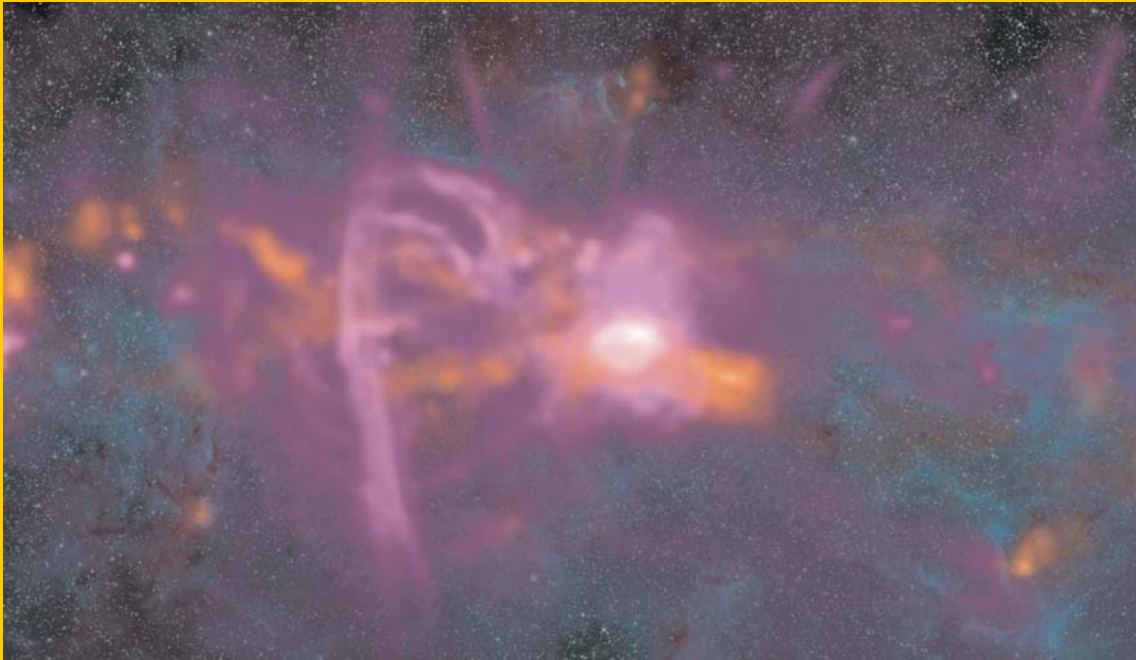
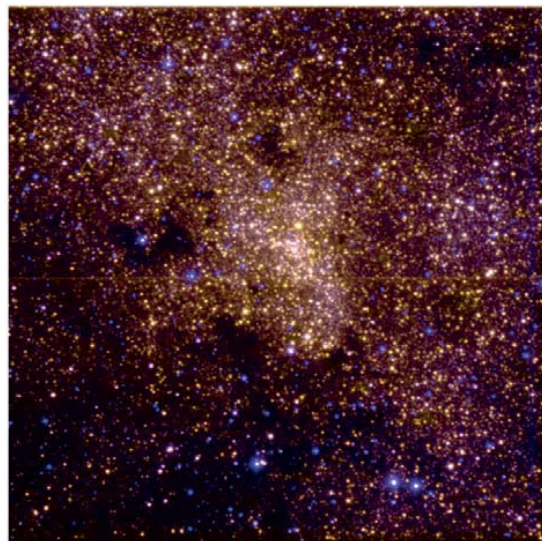
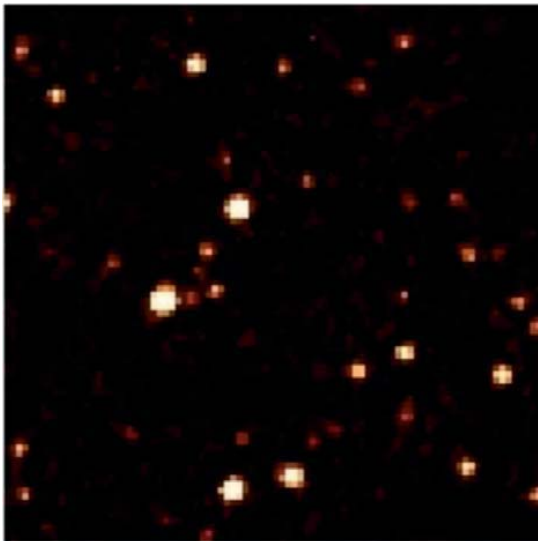


Imagen compuesta del centro galáctico en radio (púrpura), milímetros (naranja) e infrarrojo (cian). Cubre un área de 2×1 grados ($300 \text{ pc} \times 150 \text{ pc}$).

Fuente: Adam Ginsburg and John Bally (Univ of Colorado - Boulder), Farhad Yusef-Zadeh (Northwestern), Bolocam Galactic Plane Survey team; GLIMPSE II team.



El centro galáctico en luz visible (izda, del *Digitized Sky Survey*) y en infrarrojo cercano (dcha, de observaciones con la cámara de infrarrojos ISAAC del VLT de ESO). Ambas imágenes se centran en Sagitario A* y muestran la misma región de $2.5' \times 2.5'$ (en comparación, el diámetro de la luna llena es de $30'$). Debido a la extinción hacia el centro galáctico, el denso cúmulo estelar sólo puede verse en el infrarrojo. En el visible sólo se detectan las estrellas del primer plano, que aparecen azules en la imagen en infrarrojos.

discos de acrecimiento de gas alrededor de estos agujeros negro supermasivos. En estos discos el gas puede alcanzar temperaturas de hasta millones de grados Kelvin e irradiar fuertemente en todo el espectro electromagnético. De hecho, aproximadamente un 10% del gas acretado en estos discos se convierte en radiación electromagnética, en un proceso unas diez veces más eficiente que la fusión de hidrógeno que alimenta las estrellas y que convierte sólo el 0,7% de la masa en reposo en radiación.

Los astrónomos advirtieron que, si esta teoría era correcta, entonces los agujeros negros supermasivos que "encendían" los cuásares del Universo primitivo también debían estar presentes en el Universo local, aunque de manera menos activa o incluso en estado latente. Dichos agujeros se han encontrado en las dos últimas décadas mediante la observación de la dinámica estelar en los centros de las galaxias, a través de observaciones espectroscópicas de la luz estelar difusa.

Una cuestión central es, por supuesto, si existe tal agujero negro supermasivo en nuestra propia galaxia. La Vía Láctea es, en todos los aspectos, una galaxia normal que se asemeja a las miles de millones de galaxias del Universo.

Sagitario A*

En 1974, los radioastrónomos comenzaron a utilizar la todavía joven técnica de la interferometría en radio para observar el centro galáctico. Vinculando dos radiotelescopios situados a 35 km de distancia en el observatorio de Green Bank, Robert L. Brown y Bruce Balick lograron una resolución angular suficientemente alta para separar los distintos componentes de la fuente de radio Sagitario A situada en el centro galáctico. Descubrieron un objeto puntual, Sagitario A* (que se pronuncia "Sagitario A Estrella" y se abrevia SgrA*), y poco después de su descubrimiento se especuló que Sagitario A* podría ser la manifestación del agujero negro supermasivo del centro de la Vía Láctea.

En este punto, sin embargo, quedaba todavía un largo camino por recorrer hacia la prueba convincente de esta hipótesis. De hecho, durante más de dos décadas persistieron las dudas sobre si Sagitario A* obtenía su energía de un agujero negro supermasivo. Estas dudas se nutrían básicamente del hecho de que la emisión de SgrA* era muy débil para un agujero negro supermasivo, una debilidad que pudo ser explicada con éxito en la última década: Sagitario A* es un agujero negro que está pasando hambre. Esto significa que, en sus alrededores, casi no hay gas o polvo para acretar. SgrA* traga una cantidad inferior a 10^{-7} masas solares de la materia por año (una cienmilésima de Sol), una cantidad muy baja en comparación con la dieta media de los cuásares de una masa solar por año. Además de la extremadamente baja tasa de acreción, también se ha observado que el material cercano a SgrA* es acretado en lo que se denomina un flujo de acreción radiativamente ineficiente. En este flujo, la eficiencia de la conversión de masa en energía no alcanza el 10% de los discos de acreción alrededor de agujeros negros supermasivos en cuásares, sino que es muchos órdenes de magnitud más baja.

Una vez explicada la debilidad de SgrA* se eliminó un importante escollo. Sin embargo, con el fin de demostrar con éxito que Sagitario A* es un agujero negro supermasivo, todavía era necesario medir su masa y demostrar que esta masa se concentraba en un volumen tan pequeño que los modelos alternativos al de agujero negro pudieran ser excluidos. Un importante obstáculo en esta búsqueda reside en que el Sistema Solar está situado en el plano de la Vía Láctea, lo que limita las observaciones del centro galáctico a radio, infrarrojos y rayos X, longitudes de onda capaces de atravesar las grandes cantidades de gas y polvo existentes a lo largo de la línea de visión hacia el centro galáctico (ver imagen superior). Se aplicaron, principalmente, dos técnicas astronómicas: por un lado la radiointerferometría de muy larga base (VLBI), que combina radiotelescopios de todo el mundo para lograr resoluciones angulares de menos de un milisegundo de arco -una precisión inigualable por cualquier otra técnica-; y, por otro, la observación en infrarrojo cercano de las estrellas del centro galáctico en el límite de difracción de los mayores telescopios disponibles.

Dinámica estelar en las cercanías de Sagitario A*

Sagitario A* se encuentra en el centro del cúmulo estelar más denso de la Vía Láctea.

La densidad en la parte central de esta agrupación supera las 106 masas solares por pársec cúbico, más de un millón de veces la masa en la vecindad solar. Las estrellas próximas a SgrA* sufren su influencia gravitatoria, de modo que el estudio

del movimiento de estas estrellas puede emplearse para medir la masa de Sagitario A*.

Las observaciones del cúmulo estelar en el centro galáctico no fueron posibles hasta finales de 1980, cuando comenzaron a estar disponibles detectores en el infrarrojo cercano lo suficientemente sensibles.

La luz en el infrarrojo cercano puede penetrar sin problemas las nubes de polvo existentes entre la Tierra y el centro galáctico: mientras que en luz visible sólo un fotón de cada billón emitido en esa zona no es absorbido por el polvo interestelar, en el infrarrojo cercano alrededor de un 10% de la luz emitida consigue llegar hasta nosotros. La mayoría de las estrellas en el cúmulo nuclear presentan temperaturas de pocos miles de grados Kelvin y, por lo tanto, emiten una cantidad significativa de la luz en el infrarrojo cercano.

Debido a la alta densidad de estrellas en las cercanías de Sagitario A*, para distinguir las estrellas del centro galáctico es necesario hacer uso de la resolución angular de los mayores telescopios disponibles. Pero surge una dificultad importante. En su camino a través de la atmósfera, la luz de las estrellas atraviesa las regiones

de aire de diferentes temperaturas y, por tanto, con índices de refracción ligeramente diferentes. Y el viento produce una mezcla turbulenta de los paquetes de aire, lo que provoca que las imágenes de las estrellas se emborronen. Así, independientemente del tamaño del espejo principal, una estrella aparecerá como un disco de entre 0,5" y 1,5" de diámetro en las imágenes astronómicas. Es el efecto conocido como *seeing*. Para superar el efecto de la turbulencia atmosférica se han aplicado dos técnicas diferentes. La más antigua se llama *speckle imaging*, y consiste en tomar miles de imágenes con tiempos de exposición más cortos que el tiempo de coherencia de la turbulencia atmosférica (de unos pocos a unas decenas de milisegundos) y sumarlas de manera adecuada, y la limitación que impone la difracción puede ser reconstruida por ordenador. La segunda técnica, más eficaz, se conoce como óptica adaptativa y es un sistema que mide la distorsión de las imágenes en tiempo real y la corrige mediante un espejo deformable. Dado que este método requiere gran potencia computacional sólo ha sido ampliamente disponible en grandes telescopios en los últimos diez años. Mediante el uso de imágenes *speckle* o de óptica adaptativa puede alcanzarse una resolución angular

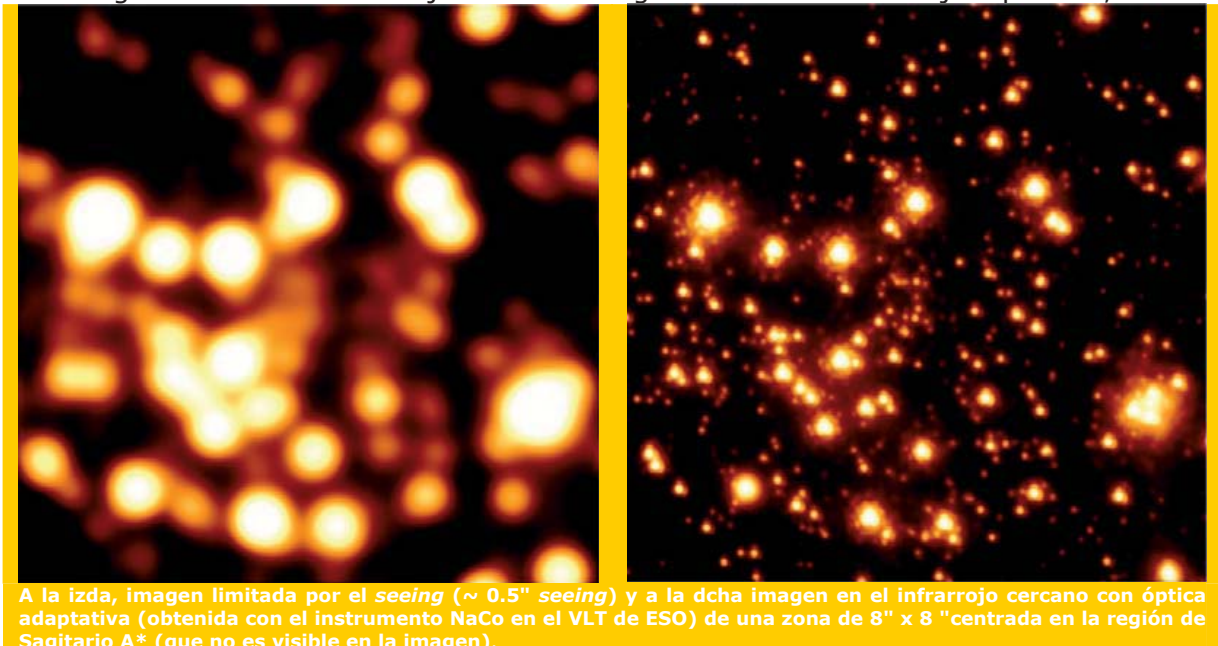
Las mediciones del tamaño de Sagitario A* con VLBI indican que debe ser menor que la distancia media de la Tierra al Sol

del orden de cincuenta milisegundos de arco en el infrarrojo cercano en telescopios de ocho o diez metros (esto equivale al diámetro de un cabello humano visto a una distancia de 400 metros).

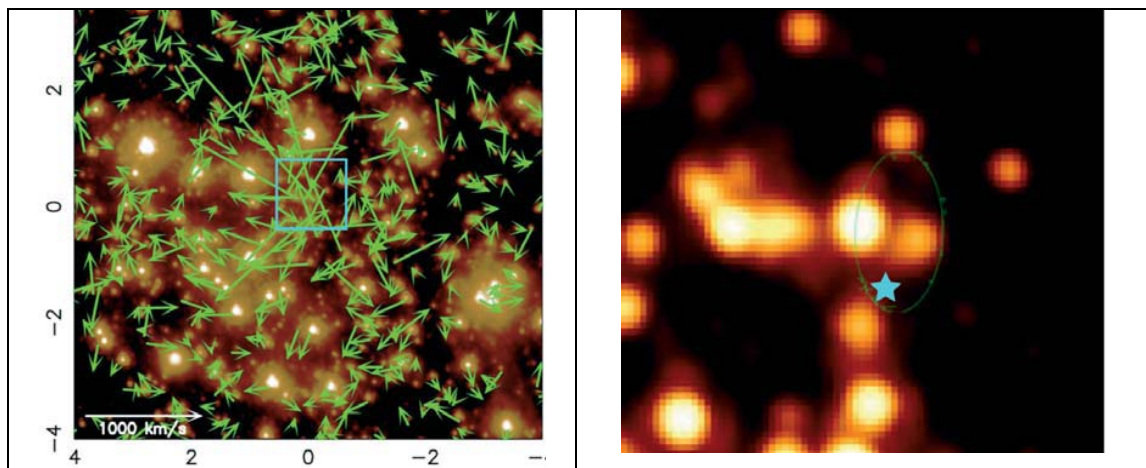
Las observaciones de las estrellas en torno a Sagitario A* con óptica adaptativa (y con *speckle*) se han llevado a cabo por dos grupos de astrónomos (con sede en EE.UU. y Alemania) con regularidad desde la primera mitad de la década de 1990. Utilizaron el telescopio NTT de ESO de 3,5 metros en La Silla (Chile), el VLT (8 metros) de ESO en Paranal (Chile), y el Telescopio Keck de diez metros en Mauna Kea (Hawaii), respectivamente. Después de una cuidadosa alineación de las imágenes tomadas en diferentes épocas lograron medir la variación de las posiciones relativas de las estrellas con el tiempo. Se trata de cambios de posición muy pequeños, del orden de unos pocos milisegundos de arco por año, lo que exige trabajar con muy alta precisión. Teniendo en cuenta la distancia al centro galáctico (8 kiloparsec o 26.000 años luz), estos movimientos pueden convertirse en la velocidad real de las estrellas en kilómetros por segundo.

En la segunda mitad de la década de 1990 los datos eran lo suficientemente precisos para demostrar que las estrellas se movían con velocidades de varios cientos de km/s en las proximidades de Sagitario A*. Aún más importante fue

hallar que la velocidad media de las estrellas aumentaba hacia SgrA* con el inverso de la raíz cuadrada de su distancia al supuesto agujero negro. Esta es exactamente la misma ley que se aplica a las velocidades de los planetas de nuestro Sistema Solar, y este comportamiento constituye una clara evidencia de que las estrellas del centro galáctico se mueven bajo la influencia gravitacional de un objeto puntual, lo



que apunta a un objeto pesado y compacto. Puede demostrarse que la masa de este objeto equivale a unos pocos millones de masas solares y que la posición de este objeto puntual coincide con la posición de la fuente de radio Sagitario A*. El último gran avance tuvo lugar en 2002/2003, cuando los astrónomos alemanes y estadounidenses adquirieron suficientes datos para determinar sin ambigüedades la órbita de una estrella individual en torno a Sagitario A*. Esta estrella, denominada S2, completa una órbita muy elíptica alrededor de SgrA* en 15 años y en su punto



Izda: indicaciones de las medidas de las velocidades estelares superpuestas en una imagen en infrarrojo cercano de NaCo /VLT de $8'' \times 8''$ del centro galáctico (basado en la obra del autor). La longitud de las flechas es proporcional a la magnitud de la velocidad. Dcha: zoom de la zona indicada por el recuadro azul, con la indicación de la órbita medida de la estrella S2 (es la estrella brillante en el centro). La marca azul muestra la posición del agujero negro Sagitario A*, que es una fuente de intensidad variable y no siempre se detecta.

de máximo acercamiento la distancia hasta SgrA* apenas alcanza las 17 horas luz (alrededor de tres veces la distancia Sol-Plutón). Desde las primeras observaciones (1992, en el NTT en La Silla) la estrella S2 ha completado una órbita alrededor de Sagitario A*. También se han determinado las órbitas de otra docena de estrellas, aunque con menor precisión. A partir de estas mediciones, y usando las leyes de

Kepler, la masa de SgrA* se ha determinado con precisión en $4,0 \pm 0,1$ millones de masas solares. Se descubrió que esta masa tiene que estar concentrada en un volumen inferior a, más o menos, tres veces el tamaño del Sistema Solar, lo que proporcionó la evidencia de que debe ser un agujero negro.

Observaciones VLBI de Sgr A*

Sagitario A* está continuamente intercambiando momento con las estrellas en su medio, mucho más ligeras. Por consiguiente, se espera que siga una trayectoria errática similar al movimiento browniano de una partícula de polvo en suspensión en el agua, donde las pesadas partículas de polvo intercambian momento con las ligeras moléculas de agua. Cuanto más pesado es Sgr A*, menor será la medida de su movimiento browniano. La posición de la fuente de radio de SgrA* se ha medido durante más de diez años con la técnica VLBI con muy alta precisión relativa a la posición de los cuásares cercanos. Dado que estos cuásares se encuentran a distancias cosmológicas, su movimiento es inmediblemente pequeño y, por lo tanto, pueden ser utilizados como un sistema de coordenadas. Las observaciones desvelan que Sagitario A* muestra una velocidad ínfima en relación con el grupo estelar circundante, lo que a su vez implica que la fuente de radio SgrA* debe contener al menos cien mil masas solares. Las mediciones del tamaño de Sagitario A* con VLBI indican que debe ser menor que la distancia media de la Tierra al Sol. Por lo tanto, las observaciones con VLBI de Sagitario A* conducen a la misma conclusión que las observaciones de infrarrojos de las velocidades de las estrellas que rodean la agrupación: la fuente de radio Sagitario A* debe estar asociada a un agujero negro supermasivo.

INVESTIGACIÓN DE SAGITARIO A* EN EL IAA

OBSERVAN CÓMO SGR A* TRITURA MATERIA A SU ALREDEDOR

Un grupo internacional de astrónomos, en el que participa Rainer Schödel (IAA), atisbó las regiones centrales de la Vía Láctea con los telescopios VLT y APEX y ha observado qué ocurre en el entorno de SgrA*, el agujero negro supermasivo que, con cuatro millones de veces la masa del Sol, sigue devorando materia. De hecho, se han detectado intensas fulguraciones producto del desgarramiento de las nubes de gas que giran, a una velocidad de vértigo, en las últimas órbitas antes de caer al agujero negro. Los investigadores emplearon los telescopios VLT y APEX, que observan en el infrarrojo y en ondas submilimétricas respectivamente, y se trata de la primera vez que se obtie-

nen medidas simultáneas de una fulguración con estos potentes instrumentos. "SgrA* es visible en la luz infrarroja durante cortos periodos de tiempo, cuando exhibe fuertes fulguraciones -explica Rainer Schödel-. Como no se puede prever cuándo ocurrirán estas fulguraciones, no es fácil observarlas con dos telescopios que no estén en el mismo lugar, porque una simple nube podría tapar la región del cielo que nos interesa". Tras varias noches de espera, los astrónomos encargados del VLT descubrieron que SgrA* se activaba, y que su brillo aumentaba cada minuto. Alertaron a sus colegas del APEX y, durante las siguientes seis horas, ob-

servaron violentas variaciones en el brillo de SgrA*, además de cuatro fulguraciones mayores. Como preveían los astrónomos, las fulguraciones se registraron en ondas submilimétricas con una hora y media de retraso con respecto a las infrarrojas, lo que se debe a la expansión de las nubes de gas que finalmente caen al agujero negro: la velocidad con la que giran las nubes en las últimas órbitas en torno a SgrA* hace que se estiren, aumenten su tamaño y se vuelvan más transparentes. Es entonces cuando la radiación puede viajar a través de ellas y llegar hasta nosotros, aunque por fases: la nube se hace transparente primero para las longitudes de onda cortas,



como las infrarrojas, y después para las que tienen una longitud mayor, como las sub-milimétricas. De ahí la hora y media de retraso. S.L.L

Este artículo aparece en el nº 27, febrero 2009, de la revista *Información y Actualidad Astronómica*, del Instituto de Astrofísica de Andalucía_CSIC, pps 2-6.