

Este artículo se publicó en el Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid para el año 2020.

FOTOGRAFIANDO AGUJEROS NEGROS

Pablo de Vicente

*Observatorio de Yebes
Instituto Geográfico Nacional - Ministerio de Fomento*

Resumen

El 10 de abril de 2019, en una conferencia de prensa conjunta en diferentes lugares del planeta, se presentó la primera imagen real de un agujero negro obtenida por un conjunto de radiotelescopios distribuidos por nuestro planeta. Ese día los informativos de televisión de la noche abrieron con la imagen y ofrecieron entrevistas a los científicos que habían participado en el proyecto. A la mañana siguiente los principales periódicos del mundo situaban en portada la imagen del agujero negro M87*. La ilustración 1 muestra una recopilación de portadas de diarios de todo el mundo que muestra el gran impacto de la noticia.

La imagen del agujero negro en M87 es un hito histórico fruto de la capacidad tecnológica del ser humano y de un trabajo en equipo realizado por astrónomos de todo el mundo que demuestra, una vez más, que es posible explorar lugares alejados de la Tierra en los entornos físicos más extremos de nuestro Universo.

En este artículo explicaré qué es un agujero negro, qué aspecto tiene, qué ocurre en su entorno más cercano y qué estrategia hay que seguir para «fotografiarlo». Finalmente revisaré brevemente las recientes observaciones de M87* y qué hemos aprendido de su imagen.

¿Qué es un agujero negro?

Un agujero negro es un lugar del universo de donde la luz no puede escapar por la atracción gravitatoria de la masa que aloja en su interior.

El nombre de agujero negro se debe a John Achibald Wheeler, un físico teórico estadounidense, que lo propuso por primera vez en 1967. El nombre resultó tan acertado que fue acogido de modo entusiasta y se adoptó inmediatamente entre la comunidad científica y el público general. Sin embargo la primera propuesta sobre la existencia de estos objetos es muy anterior a esta fecha.



Figura 1: Imagen compuesta de los principales periódicos del mundo mostrando la primera imagen de un agujero negro. Imagen cortesía de A. Zensus, 2019.

En 1783 el británico John Michell, asumiendo que la luz está compuesta de corpúsculos que sufren la atracción gravitatoria, presentó en la Royal Society de Londres un cálculo que determinaba el radio de una «estrella oscura» de masa igual a la del Sol para la que la velocidad de la luz es igual a la velocidad de escape. Se llama velocidad de escape a aquella velocidad que debe proporcionarse a un cuerpo situado en la superficie del planeta o estrella en la que se encuentra para que llegue con velocidad nula al infinito. En la Tierra dicha velocidad es 11 km/s.

El cálculo de la velocidad de escape es muy sencillo de realizar ya que sólo depende de la masa y el radio del planeta o estrella. Michell obtuvo un valor de 2,95 km para el radio de dicha «estrella oscura» de una masa solar. Recordemos que el radio del Sol es de 695 700 km, lo que significa que se debería comprimir toda su masa hasta un radio 120 000 veces menor, para conseguir un agujero negro. Michell aventuró que el Universo debía tener una infinidad de «estrellas oscuras» que no permiten que su luz escape. P. S. Laplace repitió este cálculo en 1796 sin mencionar a Michell, pero lo retiró de su libro cuando se descubrió la naturaleza ondulatoria de la luz.

En 1915 el físico alemán K. Schwarzschild, utilizando la relatividad general de A. Einstein obtuvo la geometría espacio-temporal del entorno de una estrella esférica sin rotación. La relatividad general de Einstein, publicada ese mismo año, considera que el espacio y el tiempo no son variables separadas y no existen independientemente de los cuerpos masivos, como las estrellas y los planetas. De hecho las distancias espacio-temporales en el entorno de un cuerpo masivo dependen de dicha masa. Para conocer la trayectoria de los rayos de luz cerca de los cuerpos masivos es necesario calcular cómo se deforma el espacio-tiempo, es decir determinar su geometría local. En dicho entorno las distancias y el discurrir del tiempo, ambos medibles a partir de la luz, son diferentes respecto de lugares alejados de las grandes masas.

La solución de Schwarzschild predice la curvatura del espacio y del tiempo, la dilatación de este último y el desplazamiento al rojo de la luz en las inmediaciones de la estrella. Dicho desplazamiento al rojo es infinito para una combinación crítica de masa y radio: un agujero negro. El radio obtenido por Schwarzschild para un agujero negro de una masa solar coincidía con el de Michell y Laplace pero los mecanismos que los explican eran diferentes: en este último se consideraba que la luz se frenaba y caía de vuelta, mientras que en el primero la luz queda atrapada en una circunferencia crítica. Este radio crítico define una superficie esférica denominada horizonte de sucesos.

En 1962 Roy Kerr, un físico neozelandés, calculó la geometría espacio-temporal para un agujero negro en rotación. Para ello empleó dos parámetros: la masa (M) y el momento angular o espín (a) relacionado con la rotación. En la solución de Kerr existe un valor máximo para el momento angular que depende de la masa del agujero negro. Actualmente

se considera que el modelo de Kerr es el que mejor representa los agujeros negros astrofísicos y por ello se les suele denominar de modo familiar como agujeros negros de Kerr. Más adelante veremos la importancia de la rotación para simular el aspecto de un agujero negro.

¿Existen los agujeros negros?

El cálculo de la geometría espacio temporal para los agujeros negros no es una prueba de su existencia en el Universo. Desde su predicción por la relatividad general y su aceptación por la comunidad científica su búsqueda ha sido incesante. Como veremos a continuación, en los últimos años se han ido acumulando evidencias de la existencia de agujeros negros supermasivos, es decir, con masas de varios millones de soles, y de agujeros negros de hasta cincuenta masas solares, pero hasta la fecha no se obtenido ninguna de agujeros negros entre cientos y decenas de miles de masas solares, lo que los astrónomos llaman masas intermedias.

Una de las evidencias de la existencia de los agujeros negros supermasivos procede de la observación de eyecciones brutales de material que se producen fundamentalmente en el centro de las galaxias. Cerca del 20% de las galaxias muestran una luminosidad más elevada en sus núcleos de lo que se estima asumiendo que esta sólo procede de estrellas en su interior. Este exceso se observa en todo el espectro electromagnético, desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. Las galaxias que alojan estos núcleos se las clasifica como activas y los núcleos como Núcleos Activos de Galaxias (AGN). Actualmente se considera que la extrema luminosidad de los AGN procede de la emisión de materia en forma de chorro propagándose a velocidades cercanas a las de la luz. En el origen de estos chorros están los agujeros negros con un disco de material que cae en forma de espiral hacia ellos, un toroide de polvo que, según la geometría, oculta su interior a los observadores y un chorro relativista compuesto por materia que escapa de las cercanías del agujero negro con una energía extraordinaria. En estos lugares se cree que habitan los agujeros negros supermasivos capaces de generar los eventos más energéticos del Universo y este es precisamente el caso de la galaxia M87, también conocida como Virgo A, y su agujero negro M87*.

En la actualidad se cree que todas las galaxias alojan en su núcleo un agujero negro. En algunos casos dan lugar a fenómenos activos y en otros, como en el caso de la Vía Láctea su actividad es mínima. Ello puede depender de la materia que hay a su alrededor; en ausencia de esta los agujeros negros están “hambrientos” y no pueden eyectar chorros.

Precisamente en la Vía Láctea se ha empleado otro método indirecto para confirmar y caracterizar el agujero negro que se aloja en su centro, SgrA*. Consiste en observar el material que rota a su alrededor y estimar

la masa central que lo liga y su tamaño aproximado. La masa central genera un campo gravitatorio que determina el movimiento de las estrellas en torno a ella. Estudiando la velocidad de las estrellas en rotación y su trayectoria a lo largo del tiempo es posible calcular con gran precisión la masa del objeto central y su posición, y establecer un límite a su tamaño.

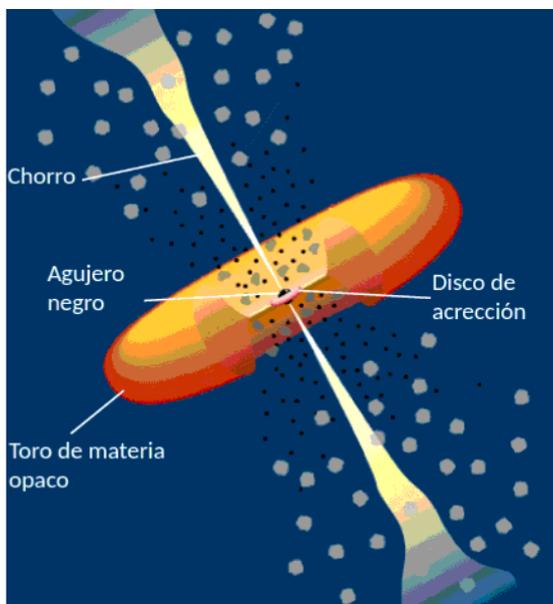


Figura 2: Modelo de un Núcleo Activo Galáctico con emisión radio intensa. Imagen de C.M. Urray y P. Padovani. Obtenida de los archivos de la NASA, 2003.

Desde hace muchos años se sabe que en el centro de la Vía Láctea existe un objeto masivo de varios millones de masas solares y que a su alrededor orbitan un cúmulo de estrellas denominadas S0 (de Sagitario). El centro de la Vía Láctea se encuentra oscurecido para la luz visible por el material, fundamentalmente polvo y moléculas, que hay en el camino de visión hasta la Tierra, por lo que la observación de estas estrellas se ha hecho en el infrarrojo cercano. Durante 16 años, de 1992 a 2008, se estudió la trayectoria de 28 estrellas S0 y como resultado se obtuvo una estimación de la masa del centro de la Vía Láctea de 4,3 millones de masas solares y una distancia a la Tierra de 8 300 parsecs. Del cúmulo de estrellas estudiadas, S0-2 es una estrella de tipo B de unas 15 masas solares que muestra el segundo periodo orbital más corto del cúmulo estelar: aproximadamente

16 años. Su periastro, máximo punto de acercamiento, en torno a SgrA* es de unas 17 horas luz (120 unidades astronómicas) y el último se produjo en mayo de 2018. La trayectoria de esta estrella se lleva estudiando desde 1995 por la Universidad de California y por el Instituto Max Planck para la Física Extraterrestre para inferir propiedades del agujero negro del centro de nuestra galaxia y los resultados de su órbita completa se han publicado muy recientemente.

Las evidencias de la existencia de agujeros negros de tipo estelar, es decir de unas pocas masas solares, también existen y proceden fundamentalmente de sistemas binarios que emiten de modo variable en rayos X. Se conocen unos 20 sistemas binarios y en 17 de ellos se cree que uno de los componentes es un agujero negro.

Sin embargo, el método indirecto más espectacular para confirmar la existencia de agujeros negros de unas decenas de masas solares y que en el futuro probablemente permitirá localizarlos en el espacio es la detección de ondas gravitacionales. Las ondas gravitacionales han sido predichas por la teoría de la relatividad general y la primera confirmación experimental mediante una observación directa se produjo en 2015. La importancia de este hallazgo fue de tal magnitud que mereció el premio Nobel de Física tan solo 2 años después, en 2017. Como ya se ha mencionado antes, según la relatividad general, el espacio-tiempo se curva de acuerdo con la masa de los objetos. Cuando los objetos masivos aceleran dan lugar a cambios en la curvatura, que se propagan a la velocidad de la luz por el espacio-tiempo en forma de ondas gravitacionales. Las ondas gravitacionales, a su paso por la Tierra pueden ser detectadas con observatorios especializados como LIGO o VIRGO.

Las detecciones de ondas gravitacionales obtenidas hasta la fecha proceden de la fusión de pares de agujeros negros y de pares de estrellas de neutrones. Todavía no se han confirmado eventos procedentes de la fusión de una estrella de neutrones y un agujero negro. En todos los casos los dos objetos orbitan el uno en torno al otro radiando energía gravitatoria, un mecanismo análogo a la emisión de energía electromagnética generada por cargas aceleradas, lo que ocasionará que se vayan acercando hasta llegar a fusionarse. En el momento de la fusión se produce un estallido final de energía que se propaga por el espacio-tiempo. El patrón temporal de la onda gravitacional que se genera depende del tipo de fusión que se realiza y permite distinguir cualquiera de los tres casos anteriores. El primer evento de ondas gravitacionales detectado, el GW150914, procedía de la fusión de dos agujeros negros de 35 y 30 masas solares que dieron lugar a un agujero negro de 62 masas solares perdiéndose en el proceso 3 masas solares que se emitieron en forma de energía gravitatoria. De los 11 eventos detectados hasta la fecha, 10 proceden de la fusión de pares de agujeros negros con masas entre 13 y 40 masas solares y el otro de una colisión de estrellas de neutrones.

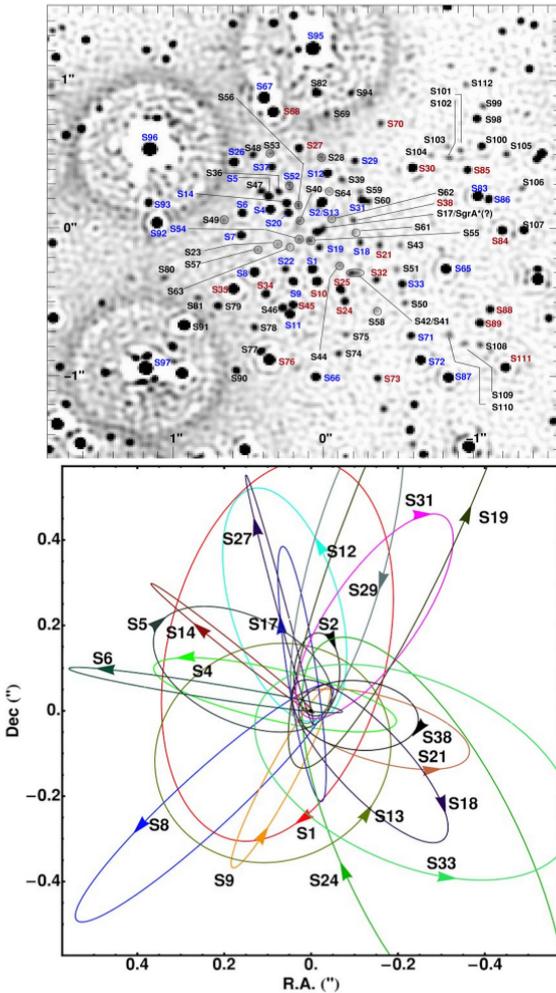


Figura 3: Panel de arriba: grupo de estrellas S0 en las inmediaciones de SgrA*. Crédito: Gillessen y cols. 2008. Panel de abajo: órbitas y trayectoria de algunas estrellas S0 en torno a SgrA*. Crédito: Kormendy y Ho, 2013.

La

detección de ondas gravitacionales será una herramienta extremadamente poderosa para la identificación, caracterización y localización de agujeros negros. En este momento es posible determinar la masa y momento angular

(espín) de los pares de agujeros negros y del agujero negro final producto de la fusión pero su localización en el cielo es muy grosera (una región de miles de grados cuadrados).

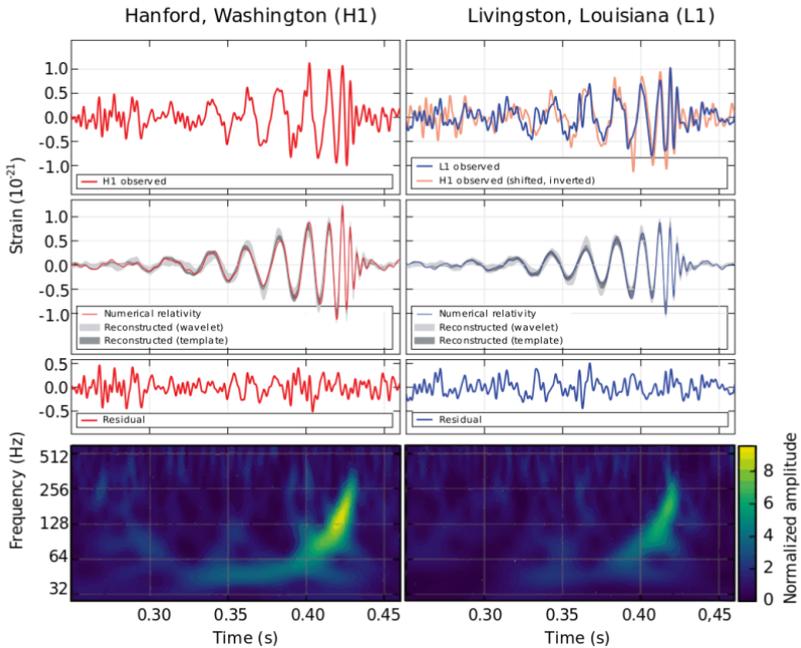


Figura 4: Patrón temporal de las ondas gravitacionales producidas por la fusión de dos agujeros negros. La detección fue en 2015 y procede de los dos observatorios que componen LIGO. Crédito: Abbott y cols., 2016.

La sombra de un agujero negro

Se puede pensar, en primera instancia, que los agujeros negros son invisibles dado que absorben la luz y no permiten que ninguna señal salga de ellos. Una fotografía en su dirección no mostrará nada, sólo oscuridad. Pero es posible capturar su silueta si se encuentran frente a una luz de fondo, como por ejemplo un campo de estrellas lejanas o materia cercana que brilla. Como explicaremos a continuación, la silueta que se obtiene para un agujero negro es muy especial debido al intenso campo gravitatorio de este.

La primera referencia conocida sobre el estudio de la trayectoria de los rayos de luz en las cercanías de un objeto masivo en estas circunstancias es de D. Hilbert en 1917. En el artículo que publicó se describe la trayectoria de los rayos procedentes de una luz de fondo situada tras el agujero negro.

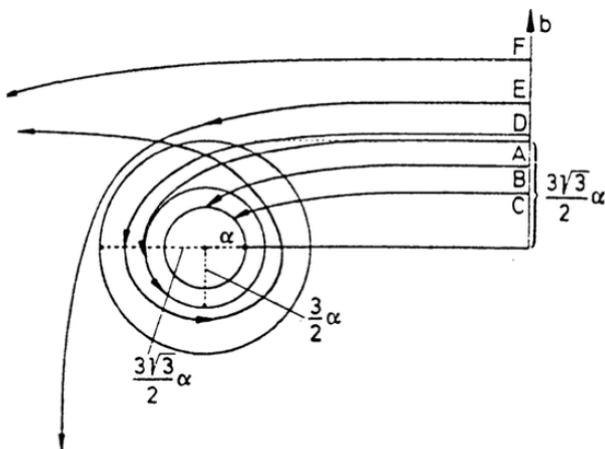


Figura 5: Trayectoria de los rayos de luz procedentes de un fondo de estrellas situado a la derecha en torno a un agujero negro sin rotación. α es el radio del horizonte de sucesos y $3\sqrt{3}\alpha/2$, el radio de la esfera de fotones. Crédito: D. Hilbert, 1917.

Para comprender mejor esta trayectoria imaginemos el agujero negro representado por un círculo en medio de una hoja de papel tal y como se muestra en la figura 5. En el lado izquierdo se encuentra el observador y en el derecho la luz de un fondo de estrellas. Los rayos de luz procedentes de la fuente de luz parten en línea recta de derecha a izquierda y en horizontal hacia el observador. Los rayos de luz más alejados del agujero negro, no se desvían, pero a medida que disminuimos el parámetro de impacto (en la imagen se denomina b y se corresponde con el punto de partida de los rayos de luz respecto del agujero negro), los rayos comienzan a curvarse. El grado de curvatura de la luz, para una determinada masa del agujero negro, depende por tanto del parámetro de impacto y del ángulo de incidencia, que en este caso es el mismo para todos los casos. Casi ninguno de los rayos cercanos al agujero negro podrá llegar al observador, salvo una pequeña parte que se corresponde con los rayos que están en el límite de la esfera de fotones en la que estos quedan atrapados en rotación casi indefinidamente. La esfera de fotones para un agujero de Schwarzschild, es decir sin rotación, tiene un radio de $3\sqrt{3}/2$ veces el radio del horizonte de sucesos.

La explicación anterior es muy simplificada porque, entre otras cosas, sólo muestra la trayectoria de los rayos con un sólo ángulo de incidencia, pero permite entender visualmente que el tamaño de la sombra de un agujero negro de Schwarzschild es mayor que su horizonte de sucesos y tiene simetría circular.

Como ya se mencionó anteriormente los agujeros negros astrofísicos están en rotación. En este caso el radio de la esfera de fotones depende de la orientación relativa del eje de giro y la esfera pierde su simetría circular. El agujero negro, en su rotación, arrastra el espacio-tiempo consigo y es el causante de que se produzca una deformación en la dirección en la que el lateral del agujero negro se aleja del observador. Esta falta de simetría la mostró por primera vez el estadounidense J.M. Bardeen en 1971.

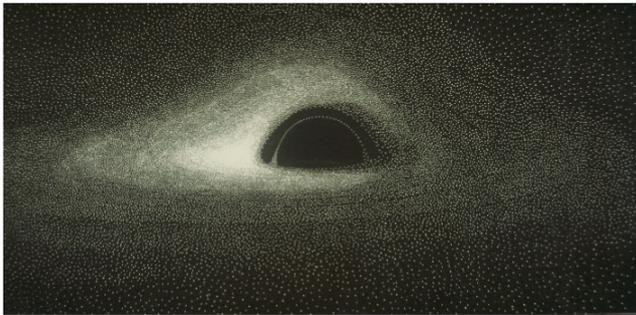


Figura 6: Aspecto de la sombra de un agujero negro rodeado por un fino disco de acreción. La parte más brillante procede de luz generada por la materia que se mueve hacia el observador. La imagen es de J. P. Luminet, 1979.

La realidad es más compleja; además de la rotación, los agujeros negros están rodeados de materia que cae a su interior a velocidades cercanas a las de la luz, en un disco de material en el que se produce una fricción enorme que da lugar a la emisión de radiación a diferentes longitudes de onda. Este disco recibe el nombre de disco de acreción. La radiación que escapa del disco se desplaza por el espacio-tiempo generando una imagen característica que depende de la orientación relativa del disco respecto del observador. La solución a la trayectoria de los rayos para este caso la obtuvo el francés J.P. Luminet en 1979. La ilustración 6 muestra el aspecto de la sombra de un agujero negro en rotación con un fino disco de acreción a su alrededor visto casi de canto. La imagen es asimétrica debido al efecto de amplificación relativista: la radiación procedente de la materia que se acerca al observador a velocidades relativistas se amplifica, mientras que

la que procede de la materia que se aleja, disminuye de luminosidad. Esa asimetría es un producto típico de la rotación de los agujeros negros.

Para poder comprender de modo cualitativo la imagen de un agujero negro cuyo disco de acreción está de canto o con un cierto ángulo respecto del observador, observemos la ilustración 7 compuesta de dos paneles. En el panel izquierdo se muestra la trayectoria de los rayos y su procedencia asumiendo que vemos el disco de acreción con un ángulo de 10 grados por encima de él. El panel de la derecha muestra la imagen que se obtendría en la placa fotográfica representada ligeramente inclinada en el panel izquierdo.

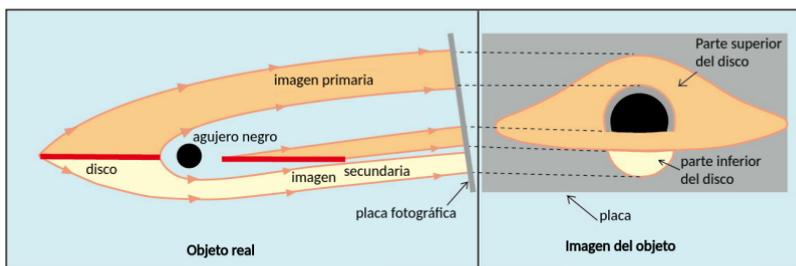


Figura 7: Panel izquierdo: diagrama esquemático de la trayectoria de los rayos de luz procedentes del entorno de un agujero negro con un disco fino de acreción (en rojo). Panel derecho: imagen recogida en la placa fotográfica que aparece en el panel izquierdo. Crédito: J. P. Luminet, 1992.

En el panel izquierdo se observa que el agujero negro actúa de lente redirigiendo la luz que procede de la parte posterior del disco hacia el observador. La imagen directa está coloreada en color salmón y se corresponde con el «capuchón» que envuelve la parte oscura del agujero negro. Los rayos de luz de la parte posterior y superior del disco se curvan hasta conseguir llegar al observador. Por otra parte la parte anterior y superior del disco genera la imagen que se encuentra por debajo de la zona oscura. La parte posterior e inferior del disco genera una imagen adicional, secundaria, que se sitúa por debajo de la imagen inferior del capuchón y en la imagen aparece coloreada en un color claro para poder distinguirla.

Una de las representaciones más vistas de un agujero negro es la que aparece en la película “Interstellar”. K. Thorne, premio Nobel de física en 2017, participó en el guión de la película como asesor científico. En ella se representa un agujero negro de 100 millones de masas solares, un altísimo momento angular ($a = 0,98$) y un fino disco de acreción. La imagen que se mostró es icónica por su espectacularidad y su alto grado de difusión pero no representaba con exactitud la realidad ya que, por exigencias

del director, se eliminó la asimetría procedente del efecto amplificación relativista generada por la materia que rota moviéndose hacia el observador.

Los cálculos de la sombra del agujero negro se han repetido desde el año 2000 por diversos investigadores con mayor grado de complejidad y contemplando casos más generales. Para ello se han utilizado simulaciones modernas de relatividad general que tienen en cuenta la caída de material, su composición y temperatura, los campos magnéticos y el transporte radiativo. Las imágenes dependen, entre otras variables, de la inclinación del eje de giro, de la velocidad de rotación y del tamaño y estructura de la región de emisión. La ilustración 8 muestran una simulación de M87*. En este caso el disco de acreción se ve desde arriba y el eje de rotación casi coincide con la línea de visión. El modelo también contempla la existencia de un chorro de materia expulsado a velocidades relativistas.

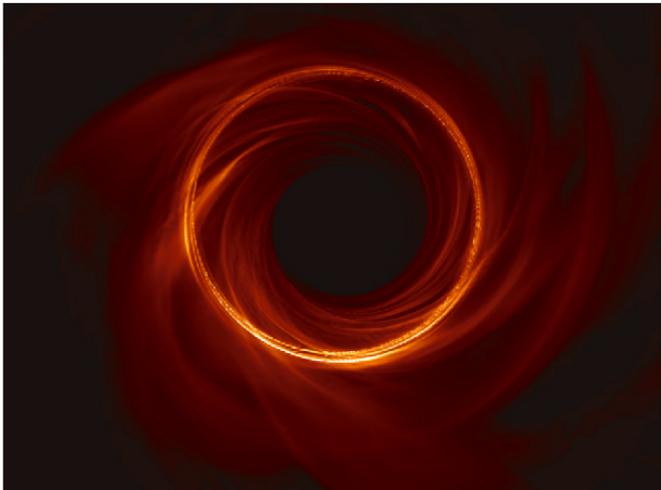


Figura 8: Simulación de M87*. En este caso el disco de acreción se ve desde arriba y el material gira en dirección de las agujas del reloj. El eje de rotación del disco forma un ángulo de 17 grados con el observador y está inclinado hacia el noreste. El material de la parte inferior del disco se acerca al observador. La imagen procede del artículo sobre la primera imagen de M87*. Crédito: colaboración EHT, 2019.

El aspecto esperado de un agujero negro es fundamental para determinar si la adquisición de una imagen real es posible y en el caso de que lo sea, elegir la técnica más adecuada para conseguirla. Como hemos visto en esta

sección el tamaño esperable de la esfera de fotones es aproximadamente tres veces el horizonte de sucesos y por lo tanto la resolución angular de la técnica observacional que se utilice debe ser capaz de proporcionar una resolución similar o inferior a ella. Pero no sólo la resolución angular es relevante, también es fundamental que la luminosidad generada por el material alrededor del agujero negro sea lo suficientemente intensa para ser detectada. Para conocer algo más sobre este extremo en la siguiente sección exploraremos algunas de las propiedades del entorno del agujero negro.

En las inmediaciones de un agujero negro

El horizonte de sucesos define la frontera a partir de la cual la luz no puede escapar de su interior, es decir delimita el agujero negro. El horizonte de sucesos en un agujero de tipo Schwarzschild es una esfera y su radio depende proporcionalmente de su masa. En un agujero negro de una masa solar el radio de la esfera es aproximadamente 3 km, y en uno de cuatro millones de masas solares, como el del centro de la Vía Láctea, el radio es casi 12 millones de kilómetros o 40 segundos luz. En un agujero negro en rotación el horizonte de sucesos es menor pero ya no tiene forma esférica por lo que no se puede caracterizar con un sólo radio.

Existe una región característica en los agujeros negros en rotación denominada ergoesfera en la que el espacio-tiempo se ve arrastrado por dicha rotación. Fuera de la ergoesfera es posible orbitar el agujero negro tanto en la dirección de la rotación como en la opuesta pero dentro de la ergoesfera las órbitas retrógradas no son posibles. La ergoesfera se encuentra fuera del horizonte de sucesos y tiene una forma achatada o elipsoidal. El mecanismo de Penrose, propuesto por el físico matemático inglés del mismo nombre, permite que las partículas y la radiación que entran en la ergoesfera escapen de ella con mayor energía de la que entraron a expensas del momento angular del agujero negro, que disminuye su valor. Este hecho es fundamental para explicar el origen de los chorros relativistas de materia.

La esfera de fotones de un agujero negro es aquel lugar en el que los fotones quedan atrapados casi indefinidamente como hemos visto antes. En un agujero negro sin rotación es aproximadamente 2,6 veces el radio de Schwarzschild por lo que la sombra de un agujero negro es mayor que la del radio del horizonte de sucesos. Por otra parte la esfera de fotones para un agujero negro en rotación deja de ser tal y se transforma en una región compuesta por varias esferas cuyo tamaño depende del sentido de rotación de los rayos. Los rayos de luz que rotan en el mismo sentido que el agujero negro se acercan más a este y definen una esfera más pequeña que la de los rayos de luz que rotan en sentido opuesto. Los tamaños para diferentes

sentidos de rotación de la luz son diversos y varían entre el tamaño mínimo y el máximo.

En la cercanía de los agujeros negros operan unas enormes fuerzas de marea con resultados dramáticos para la materia que está cerca. La gravedad es una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa a dos objetos. Supongamos un cuerpo celeste muy masivo, como por ejemplo el Sol. La fuerza que percibe un objeto de cierto tamaño en las inmediaciones del Sol es mayor en la parte cercana al Sol que la que se encuentra más alejada de él. Esta diferencia de fuerzas se conoce con el nombre de fuerzas de marea y recibe esa denominación porque es la que explica las mareas en la Tierra. Las fuerzas de marea son inversamente proporcionales al cubo de la distancia y directamente proporcionales a la masa del cuerpo celeste. Esto significa que disminuyen muy rápidamente con la distancia. En un agujero negro las fuerzas de marea pueden ser gigantescas en su proximidad. Sin embargo, sorprendentemente, las fuerzas de marea son mucho mayores en los agujeros negros pequeños que en los grandes. La razón es sencilla de comprender y para ello usaremos un ejemplo. Supongamos que situamos un cuerpo en el horizonte de sucesos de un agujero negro. Si este es pequeño el radio hasta el centro es muy pequeño, unos 3 km en el caso de una masa solar y las fuerzas de marea son gigantescas. Ese mismo objeto situado en el horizonte de sucesos del agujero negro de la Vía Láctea sufre una fuerza de marea 16 billones de veces menor debido a que esta depende del cubo del radio aunque la masa sea 4 millones de veces mayor. La fuerza de marea en este caso puede ser tan pequeña como la que experimenta la Tierra.

Las fuerzas de marea dan lugar a lo que se llama «espagnetificación», es decir, en las cercanías de un agujero negro cualquier objeto se estira en la dirección de este hasta romperse en átomos por la diferencia de la fuerza gravitatoria entre sus partes. Este efecto puede dar lugar a la destrucción de estrellas que orbitan los agujeros negros, o simplemente de materia interestelar que se acerca a este en forma de filamentos alargados.

Chorros de materia

El gas caliente que existe en el espacio interestelar, está habitualmente ligado a campos magnéticos. En un disco de acreción en torno a un agujero negro, la materia que cae arrastra consigo al campo magnético. Este produce una fricción que ralentiza la caída del material; la fuerza centrífuga no puede compensar la gravitatoria y el material se acelera girando más rápidamente. De este modo la fricción magnética extrae energía del disco de acreción que se libera emitiendo luz.

Se piensa que en los agujeros negros supermasivos el campo magnético es arrastrado hasta la ergoesfera donde se queda «bloqueado» y se retuerce

arrastrado por la rotación del agujero negro y del espacio a su alrededor. El movimiento giratorio del campo magnético produce un campo eléctrico de dinamo que impulsa el material ionizado desde la ergosfera a lo largo de dos direcciones opuestas a velocidades próximas a las de la luz dando lugar a los chorros. A través de este mecanismo el agujero negro proporciona directamente, a expensas de su rotación, la energía tan brutal necesaria para impulsar la materia a velocidades relativistas a lo largo de dos haces finamente colimados hasta distancias gigantescas. Se cree que según este mecanismo los chorros estarían formados fundamentalmente por electrones pero también por antimateria. El grado de colimación obtenido de este modo es asombroso porque los chorros se extienden hasta distancias 10^{10} veces la distancia entre el lugar de formación del chorro y el agujero negro.

Existe una explicación alternativa a la formación de los chorros, pero en este caso la energía no se extraería directamente del agujero negro y los chorros no estarían tan colimados ni la energía disponible para acelerar la materia sería tan alta. Es posible que ambos mecanismos existan en el universo dando lugar a diferentes tipos de chorros en torno a agujeros negros. En el futuro, con mayor calidad en las observaciones será posible discernir entre ambos escenarios.

Los chorros relativistas asociados a agujeros negros supermasivos con un espín elevado son los responsables, en última instancia de los núcleos activos de las galaxias. De entre estos los más conocidos son los cuásares. Los cuásares son núcleos de galaxias con un agujero negro supermasivo que expulsa la materia, electrones relativistas, prácticamente en la dirección de la Tierra. Si la dirección del chorro coincide exactamente con la de la Tierra, reciben el nombre de blazares.

La interferometría como herramienta para tomar imágenes de alta resolución

Visto desde la Tierra la escala angular del horizonte de sucesos de los agujeros negros supermasivos más cercanos o/y más grandes, como SgrA* o M87*, es del orden de 30 microsegundos de arco. Por otra parte, como acabamos de explicar en las dos secciones anteriores, la luminosidad procedente de los chorros de materia eyectados por los agujeros negros y del disco de acreción es extremadamente elevada. Este tipo de emisión actualmente sólo puede ser observada por una técnica astronómica que se emplea a frecuencias radio, la Interferometría de Muy Larga Base también conocida por sus siglas en inglés, VLBI.

La radio interferometría es una técnica observacional astronómica de más de 70 años de antigüedad. M. Ryle, astrónomo británico y premio Nobel en 1974, construyó el primer interferómetro radio en

1946. La interferometría consiste en la observación simultánea de un mismo objeto celeste con varios radiotelescopios separados entre sí una cierta distancia. A distancias cortas, hasta de unos pocos kilómetros, los elementos del interferómetro están conectados físicamente entre sí y comparten las señales de referencia. Si los radiotelescopios que componen el interferómetro están separados centenares o miles de kilómetros el interferómetro se le considera desconectado y la técnica recibe el nombre de VLBI. Los retos tecnológicos para el VLBI son mayores que para los interferómetros conectados y la gestión de las observaciones es más compleja. La primera observación de VLBI se realizó en 1967 entre dos telescopios canadienses. Desde entonces el número de radiotelescopios capaces de observar con esta técnica ha ido creciendo y el VLBI es una técnica de observación asentada en astronomía.

La interferometría tiene como objetivo mejorar la resolución angular. La resolución angular es la capacidad que tiene un telescopio para distinguir dos objetos cercanos en el cielo, y por tanto se mide en forma de ángulo. Se trata por tanto de una medida de la nitidez de las imágenes astronómicas. Cuanto menor es el valor, se suele medir en fracciones o múltiplos de segundo de arco, mayor es la nitidez y por eso, coloquialmente, se dice que la resolución angular es mayor. La resolución angular de un telescopio no puede ser infinita porque está limitada por la difracción de la luz y es directamente proporcional a la longitud de onda e inversamente proporcional al diámetro del telescopio, o a la separación entre telescopios. Por tanto observar a frecuencias más altas, es decir con longitudes de onda menores, aumenta la resolución angular. También incrementar el tamaño de los radiotelescopios o su separación aumenta la resolución angular.

En un interferómetro con varios radiotelescopios, la señal procedente de ellos se muestrea muy rápidamente y se graba en discos magnéticos en cada una de las estaciones. Desde cada estación los datos grabados se envían después, o en tiempo real, a un centro de procesado que multiplica las señales de dos radiotelescopios y las acumula un periodo de tiempo corto, típicamente unos segundos, para obtener una señal con mayor sensibilidad. Este proceso se hace con todas las posibles parejas de radiotelescopios que forman el interferómetro y se le conoce con el nombre de correlación.

El producto final de la correlación es una función, es decir un conjunto de valores, donde cada valor depende de la distancia entre cada pareja de radiotelescopios y de su orientación respecto del objeto celeste. Cuando las observaciones duran varias horas, la orientación de los radiotelescopios con respecto al objeto celeste cambia debido a la rotación terrestre. Ello es equivalente a realizar una observación mucho más corta variando la distancia entre los telescopios. Esta forma de conseguir «mover» los radiotelescopios durante una observación empleando la rotación terrestre se le denomina síntesis de apertura y fue uno de los motivos por los que Ryle recibió el premio Nobel.

La síntesis de apertura pretende generar un radiotelescopio virtual del tamaño de la máxima distancia entre los elementos del interferómetro moviendo de modo relativo los radiotelescopios del interferómetro a lo largo del tiempo de observación. Para comprender esto utilicemos una analogía. Imaginemos un radiotelescopio virtual del tamaño de la Tierra compuesto por unos pocos paneles diminutos. Cada panel en realidad es un radiotelescopio que en lugar de redirigir la radiación a un punto central, la recoge y graba para enviarla a un lugar de procesamiento central. Los paneles se mueven lentamente a lo largo de la observación intentando cubrir los huecos que hay. Téngase en cuenta que prácticamente toda la superficie de este telescopio virtual está vacía. Este sistema tiene algunas pegas: carece de la sensibilidad del telescopio real equivalente porque su superficie colectora es la suma de la de los radiotelescopios del interferómetro y no la superficie de la Tierra y sólo vale para objetos celestes cuya emisión no cambie durante el tiempo que dura la observación, típicamente 24 horas máximo. Es decir, vale para objetos extremadamente brillantes y estables durante un día aproximadamente. A pesar de estas pegas el telescopio virtual tiene la resolución angular del telescopio real que simula.

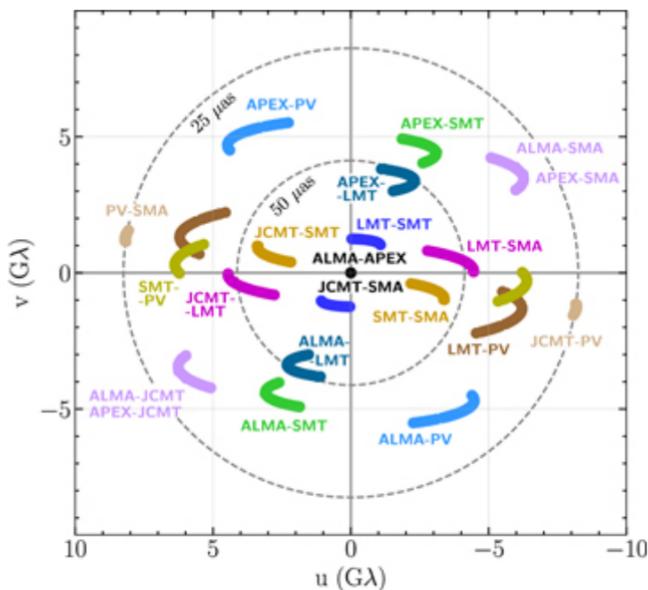


Figura 9: Ejemplo gráfico de síntesis de apertura. La imagen representa la «superficie virtual» del interferómetro en la observación de M87*. En términos astronómicos se le denomina cobertura en el plano uv. Crédito: colaboración EHT, 2019.

Si se pudiera muestrear toda la superficie del radiotelescopio virtual moviendo los radiotelescopios o aumentando su número, la función de correlación que se obtendría sería, matemáticamente, proporcional a la transformada de Fourier de la imagen del objeto que se desea "fotografiar". Es decir, disponiendo de la función de correlación completa es posible aplicar una operación matemática inversa que nos devuelve la imagen del objeto celeste que se está observando.

La red de radiotelescopios que se utilizó para observar M87* se constituyó deliberadamente para conseguir la máxima sensibilidad posible y una resolución angular de unos 25 microsegundos de arco.

El Event Horizon Telescope

El Event Horizon Telescope (Telescopio del Horizonte de Sucesos), conocido habitualmente como EHT, es un consorcio internacional para la observación de los agujeros negros supermasivos que se encuentran en el centro de la Vía Láctea y en el interior de los núcleos activos más cercanos y brillantes de galaxias. Está constituido por más de 200 personas de 60 instituciones diferentes en 20 países. Existen equipos de trabajo para la observación, el análisis de los datos, la simulación de las condiciones físicas en el entorno de los agujeros negros y el tratamiento de imágenes.

Los radiotelescopios que forman parte de EHT ya existían antes del proyecto y están distribuidos a lo largo del globo terrestre. El EHT les ha dotado de sistemas de adquisición y grabación de datos de última generación para formar una red de VLBI con una resolución angular similar a la del horizonte de sucesos de los agujeros negros que quiere estudiar. Para obtener estas resoluciones angulares los radiotelescopios observan a 230 GHz (1,3 mm), la frecuencia más alta utilizada hasta la fecha en observaciones de VLBI. Estas frecuencias introducen mayor complejidad técnica que las tradicionales frecuencias en el rango centimétrico.

El elemento más importante de la red de observación del EHT es el interferómetro ALMA debido a que su gran sensibilidad permite detectar con mayor fidelidad la estructura de las fuentes estudiadas. ALMA es un interferómetro compuesto por 64 antenas situadas en Chile a una altitud de unos 5000 m, que trabaja a longitudes de onda milimétricas y submilimétricas. Es, sin ninguna duda, el mejor instrumento astronómico existente en estas longitudes de onda y es fruto de una colaboración internacional entre Europa, Estados Unidos, Japón y Chile. Los datos procedentes de ALMA se deben combinar de un modo especial para presentarlos al resto de la red EHT como si procediesen de un sólo gran radiotelescopio.

El EHT funciona solamente unos pocos días al año, habitualmente dos semanas en abril, ya que los radiotelescopios están, cada uno de ellos,

dedicados a muchos otros proyectos de astronomía. La primera campaña de observación comenzó en 2017 y, como ya se mencionó en la introducción, fue un gran éxito. Desde entonces se ha participado en dos campañas más y el número de radiotelescopios participantes ha aumentado. También se prevé el aumento de la frecuencia de observación a 320 GHz en breve.

Los primeros candidatos elegidos para ser observados fueron SgrA* y M87*. Como ya hemos mencionado al comienzo de forma extensa, SgrA* se encuentra en el centro de nuestra galaxia y es el agujero negro masivo más cercano a la Tierra. M87* es un agujero negro supermasivo alojado en el centro de la galaxia elíptica M87 que se encuentra a una distancia de 53 millones de años luz, unas 22 veces la distancia de la Tierra a la Galaxia de Andrómeda una de las más cercanas a la Vía Láctea. Se trata de un núcleo activo de galaxia y desde hace años se conoce la existencia de un chorro de materia colimado que apunta casi en la dirección de la Tierra como se observa en la figura 10.

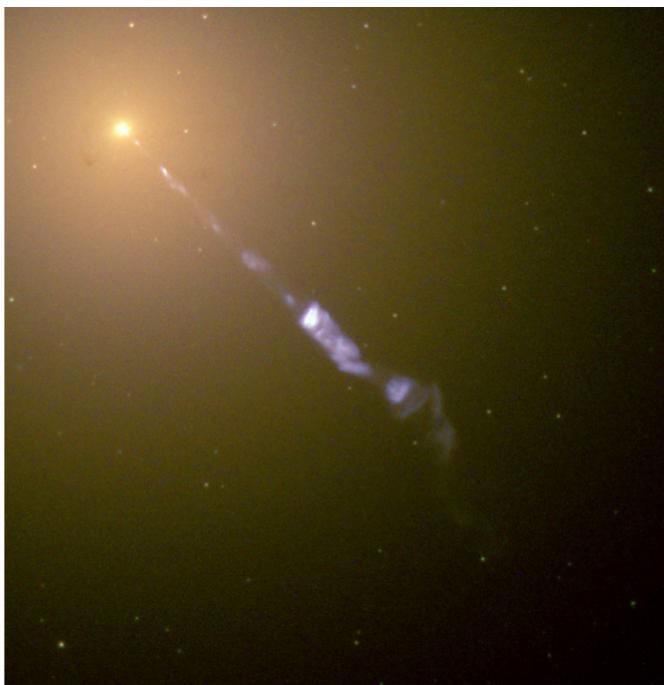


Figura 10: Galaxia Virgo A con su chorro relativista casi en dirección a la Tierra.

Las observaciones de M87*

Las observaciones de M87* y SgrA* se hicieron entre el 5 y el 11 de abril de 2017 y en ellas participaron 8 radiotelescopios cuya localización se muestra en la figura 11. Los telescopios se sitúan en Europa, Norteamérica, Sudamérica, la Antártida y las islas Hawái. El telescopio europeo se encuentra en Pico Veleta, Granada y es operado por el Instituto de Radioastronomía Milimétrica, cuyo socio en España es el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

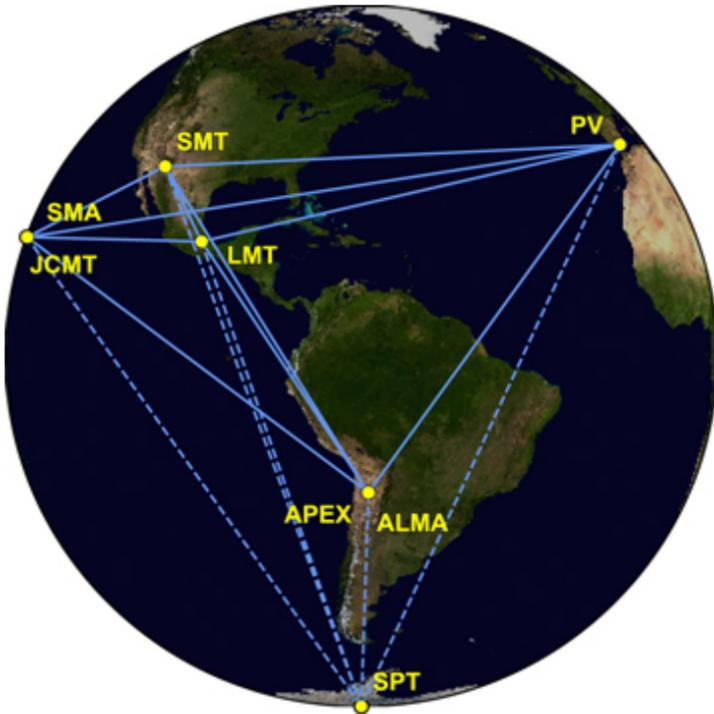


Figura 11: Telescopios que participaron en la observación de M87* y SgrA* en abril de 2017. Las líneas indican las líneas de base del interferómetro EHT. Crédito: colaboración EHT, 2019.

Las líneas de base del interferómetro tienen longitudes que oscilan entre 160 m y 10 700 km. Como resultado la resolución angular teórica del telescopio virtual sintetizado fue de 25 microsegundos de arco. Los radiotelescopios estaban equipados con instrumentación que les permitió

registrar las dos polarizaciones de la luz y un ancho de banda en frecuencia de 2 GHz, un valor superior al habitual en las observaciones tradicionales de VLBI, que permite recoger más energía de la fuente y por tanto detectarla más fácilmente.

Las observaciones se hicieron a una frecuencia de 230 GHz, correspondiente a una longitud de onda de 1,3 mm, con un tiempo excelente en todos los lugares. La atmósfera terrestre tiene una gran influencia cuando se observa a longitudes de onda milimétricas y submilimétricas, ya que su opacidad (falta de transparencia) depende de la cantidad de vapor de agua que contiene. Por ello todos los radiotelescopios del EHT se encuentran en lugares secos a gran altitud o/y en lugares muy fríos como la Antártida.

Los datos recogidos y grabados se enviaron a dos centros de análisis diferentes situados en Estados Unidos y en Alemania donde se correlaron, integraron y calibraron. Los datos así preprocesados se distribuyeron a diferentes grupos del consorcio EHT para la obtención independiente de las imágenes de los objetos que se observaron. La fuente astronómica en la que se trabajó en primer lugar fue M87*.

Obteniendo la imagen de M87*

La reconstrucción de la imagen de M87* y de cualquier fuente observada con VLBI no es sencilla. Como dijimos más arriba la imagen se obtiene haciendo una operación matemática, la transformada de Fourier inversa, sobre la función de correlación completa. Sin embargo dado que tenemos un número limitado de radiotelescopios, sólo disponemos de una función de correlación incompleta. Esto quiere decir que existen infinitas imágenes diferentes que producen los mismos datos que se han observado. Existen técnicas en radioastronomía para poder obtener imágenes correctas a partir de datos incompletos. El consorcio EHT empleó dos tipos de algoritmos diferentes que reconstruyen la imagen empleando múltiples iteraciones en las que se aplican restricciones que limitan las posibles soluciones. La principal restricción es que la imagen que se obtenga tenga sentido físico; por ejemplo que sea compacta.

Para evitar sesgos en la obtención de las imágenes, se crearon 4 grupos de trabajo independientes para que cada uno de ellos produjera una imagen a partir de datos parcialmente calibrados. En este primer paso todos los grupos obtuvieron una imagen con fuertes coincidencias: un anillo de luz de unos 40 microsegundos de arco de diámetro, más brillante en su parte sur. En un segundo paso se utilizaron tres sistemas diferentes de procesamiento de imagen que utilizaban de partida varios modelos geométricos teóricos compatibles con los datos. Se jugó con varios parámetros libres y se crearon unas 70 000 imágenes diferentes. De entre ellas se seleccionaron aquellas que se ajustaban mejor a los datos. Dado que los diferentes algoritmos

producen resoluciones angulares ligeramente diferentes, las imágenes se difuminaron a una resolución angular común de 20 segundos de arco, que es aproximadamente la del telescopio virtual sintetizado.

La imagen final, promedio de las que se obtuvieron con los diferentes métodos, se muestra en el panel superior de la ilustración 12 y corresponde a la observación del 11 de abril, pero también se incluyen las de los días 5, 6 y 10 de abril en el panel inferior. Como se puede apreciar todas son muy similares y presentan diferencias muy leves entre ellas. La imagen 12 es la que se mostró al mundo el 10 de abril de 2019, dos años después de su observación.

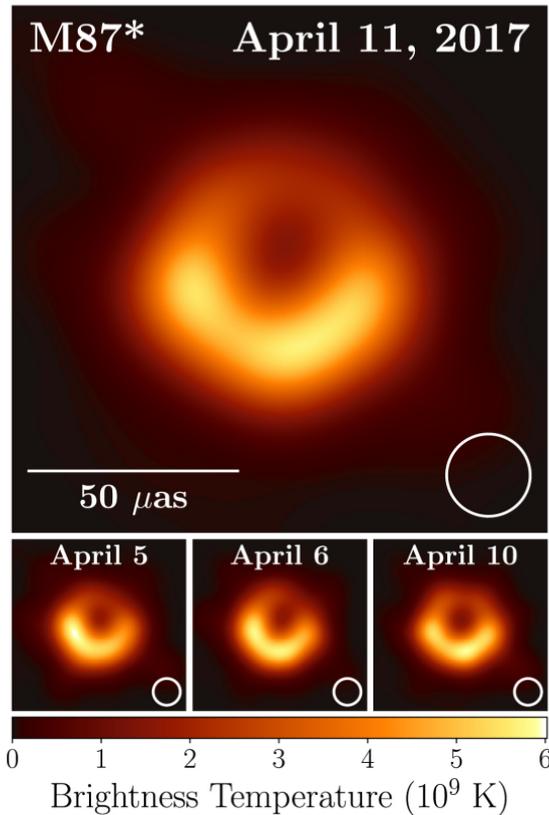


Figura 12: Primera imagen de un agujero negro. Se muestra la imagen de M87 en el día 11 de abril en el panel superior y de los días 5, 6 y 10 en el inferior. La escala angular se muestra con un segmento lineal y la resolución del interferómetro con una elipse. Crédito: colaboración EHT. 2019.

Esta imagen es la primera evidencia directa y gráfica de la existencia de los agujeros negros jamás obtenida.

Interpretando la imagen

La interpretación de la imagen requirió un trabajo teórico paralelo a los de análisis y construcción de imágenes por un grupo dedicado del EHT que se ocupa de la modelización. Este grupo desarrolló un modelo con varios escenarios para un disco de acreción en torno a un agujero negro en rotación. Se asumió que el material del disco es turbulento, está magnetizado y es caliente. El modelo produjo un chorro energético, una sombra y un anillo asimétrico. Empleando varios centenares de escenarios físicos diferentes con varios parámetros cada uno de ellos, se generó una colección de más de 62 000 imágenes, que se compararon con la imagen final.

A partir de dicha comparación se puede concluir que el anillo de luz procede de emisión que se genera en un disco en rotación que gira en el sentido de las agujas del reloj. El eje de giro forma un ángulo de unos 17 grados aproximadamente en dirección noreste con la línea de mira, es decir en dirección hacia la Tierra. La zona más brillante del disco corresponde a materia que se acerca a la Tierra en su rotación y cuya intensidad se amplifica por efecto relativista. El diámetro del disco muestra el diámetro de la esfera de fotones y a partir de él se puede inferir que la masa del agujero negro es de 6 500 millones de masas solares. El agujero negro gira en el mismo sentido que el disco de acreción e imprime dicha rotación al chorro de materia que se origina en la ergoesfera. Es decir el agujero negro está alimentando directamente el chorro relativista. Todas estas conclusiones son compatibles con lo que se conocía anteriormente de M87* por observaciones anteriores y por tanto refuerzan la interpretación de la imagen.

Las observaciones de M87* se publicaron en abril de 2019 en la revista de astronomía *Astrophysical Journal* en seis artículos diferentes que cubren diferentes aspectos del trabajo realizado: observaciones, análisis y calibración, simulación, creación de imágenes e interpretación física, así como un artículo resumen que incluye todas las demás. Algunas de las imágenes de este artículo están tomadas de allí.

¿Y el centro de nuestra galaxia?

El EHT también observó SgrA*, pero su imagen todavía no se ha publicado. SgrA* es un agujero supermasivo que tiene 1000 veces menos masa que M87* pero se encuentra a una distancia 2000 veces más cercana a

la Tierra. Su tamaño aparente es por tanto, similar a M87* pero su actividad es menor.

Hay dos razones fundamentales por las que la imagen de SgrA* todavía no está disponible. La presencia de material interestelar con movimiento turbulento entre el centro de nuestra galaxia y la Tierra, afecta a la luz que procede de allí, emborronando la imagen que se podría obtener. Se cree que aunque este emborronamiento decrece a medida que la frecuencia de observación aumenta, es variable en el tiempo. Por otra parte la variabilidad de la emisión de la luz de SgrA* impide la obtención de una imagen estática. SgrA* emite radiación variable con un periodo de minutos y esto hace prácticamente imposible aplicar la síntesis de apertura a esta fuente porque su estructura cambia a medida que pasa el tiempo. Para poder obtener imágenes fiables será necesario aumentar el número de radiotelescopios, fundamentalmente en el hemisferio sur de la Tierra, y aplicar técnicas de análisis de datos que tengan en cuenta esta variabilidad.

SgrA* todavía oculta su sombra a los astrónomos pero será cuestión de tiempo desvelar su estructura. En el futuro no sólo veremos una imagen, sino una película con diferentes fotogramas con SgrA* como protagonista.

El futuro

El futuro de la observación de los agujeros negros pasa por aumentar la fidelidad de las imágenes y la resolución angular. La fidelidad mejorará con un mayor número de radiotelescopios, pero la resolución angular a 230 GHz se encuentra limitada a 25 segundos de arco debido al tamaño de la Tierra. Esta sólo permite observar dos agujeros negros: M87* y SgrA*. Para obtener mejores resoluciones angulares con las actuales líneas de base es necesario aumentar la frecuencia de observación, aunque ello no es trivial ya que la atmósfera es más opaca y más ruidosa a medida que la frecuencia crece.

Otro modo de incrementar la resolución angular es el uso de radiotelescopios en el espacio. En estos momentos ya se discute la posibilidad de usar telescopios espaciales en órbitas bajas o medias. La observación en el espacio además permitirá el uso de frecuencias de observación de hasta 700 GHz en combinación con ALMA, pues al hallarse a 5.000 m de altura puede observarse eficientemente hasta tan altas frecuencias.

La combinación de un mayor número de radiotelescopios en tierra y en el espacio y el aumento de frecuencia permitirá la observación de una veintena de agujeros negros con resoluciones angulares de unos pocos microsegundos de arco. Seremos capaces de obtener secuencias temporales en el entorno de su horizonte de sucesos e incluso observar pares de agujeros negros supermasivos en rotación uno en torno al otro. Puede que

incluso sea posible observar agujeros negros de baja masa con discos de acreción en la Vía Láctea si conseguimos encontrar su localización.

Todo ello servirá para comprobar el funcionamiento de las actuales leyes físicas, en particular de la Relatividad General, en los lugares más extremos del Universo.

Para saber más

Los artículos del consorcio EHT sobre la imagen del agujero negro están publicados en el *Astrophysical Journal* y son de acceso libre pero también se pueden encontrar en ArXiv. El primer artículo es un resumen del trabajo realizado y constituye un ejemplo de cómo se debe escribir un artículo científico, con una prosa elegante, ágil y precisa. Se puede extraer información de calidad de dicho artículo y de los cinco siguientes que detallan aspectos de la observación de M87*. En ellos figura un arsenal de referencias bibliográficas para quien desee saber mucho más.

Si desea leer divulgación de calidad sobre agujeros negros, Kip Thorne, premio nobel de Física en 2017, ha escrito dos libros muy recomendables. *Agujeros negros y tiempo curvo*, escrito en 1994, es un libro excelente, que le mostrará el desarrollo de algunos aspectos de la Física del siglo XX relacionados con los agujeros negros. Para los cinéfilos que hayan visto la película *Interstellar*, K. Thorne escribió un libro del mismo nombre con ilustraciones en color, que desentraña los detalles de la película desde el punto de vista de un físico.

Agradecimientos

Deseo agradecer a Fernando Barbero, Pere Planesas, María Sánchez y Javier González la lectura crítica de este artículo y sus comentarios que han servido para mejorar la versión original.