

Agujeros negros supermasivos

Vivimos en un universo repleto de agujeros negros, algunos provenientes de la muerte de estrellas y otros, con masas millones de veces mayores que la solar, del nacimiento de las galaxias

José Luis Gómez Fernández y Wolfgang Steffen

CONCEPTOS BASICOS

- Al parecer, todas las galaxias, incluida la nuestra, albergan en su centro un "agujero negro supermasivo": un agujero negro cuya masa equivale a la de miles de millones de estrellas.
- En torno a esos agujeros se forman discos de acrecimiento de materia. Se generan además inmensos chorros de electrones, acelerados casi hasta la velocidad de la luz. La estratificación de las energías que emiten informa acerca de la naturaleza del objeto que se encuentra en el centro y cuya atracción crea esas estructuras.
- Los instrumentos astronómicos se están acercando a la resolución necesaria para observar el horizonte de sucesos de los agujeros negros del centro de las galaxias, la frontera que aísla para siempre del resto del universo a la materia y a la luz que la cruzan.

Podríamos imaginarnos el espacio como una sábana agarrada por los extremos, para que permanezca estirada. Si lanzamos una bola de billar encima, se curvará. Algo análogo, según la teoría de la relatividad general, le hace una estrella al espacio; cuanto mayor sea la masa de la bola, o de la estrella, más pronunciada será la curvatura generada. En un agujero negro la curvatura adquiere una intensidad tal, que el espacio se "rompe": se le hace un "agujero". Este agujero, más propiamente denominado *singularidad*, supone un verdadero desafío: las leyes de la física tal y como las conocemos hoy en día, incluidas las de la relatividad general, carecen allí de validez.

Tan enorme curvatura, o gravedad, afecta también a los rayos de luz. La velocidad necesaria para escapar de la atracción gravitatoria de un cuerpo es proporcional a su masa: a mayor masa, mayor velocidad. En la vecindad de los agujeros negros, la gravedad es tan alta, que la velocidad de escape se hace mayor que la de la luz: ni siquiera ésta puede escapar. De ahí que sean invisibles, "negros". La distancia de la singularidad a la que la velocidad de escape iguala a la de la luz define una superficie en torno al agujero negro, el *horizonte de sucesos*. El sistema formado por la singulari-

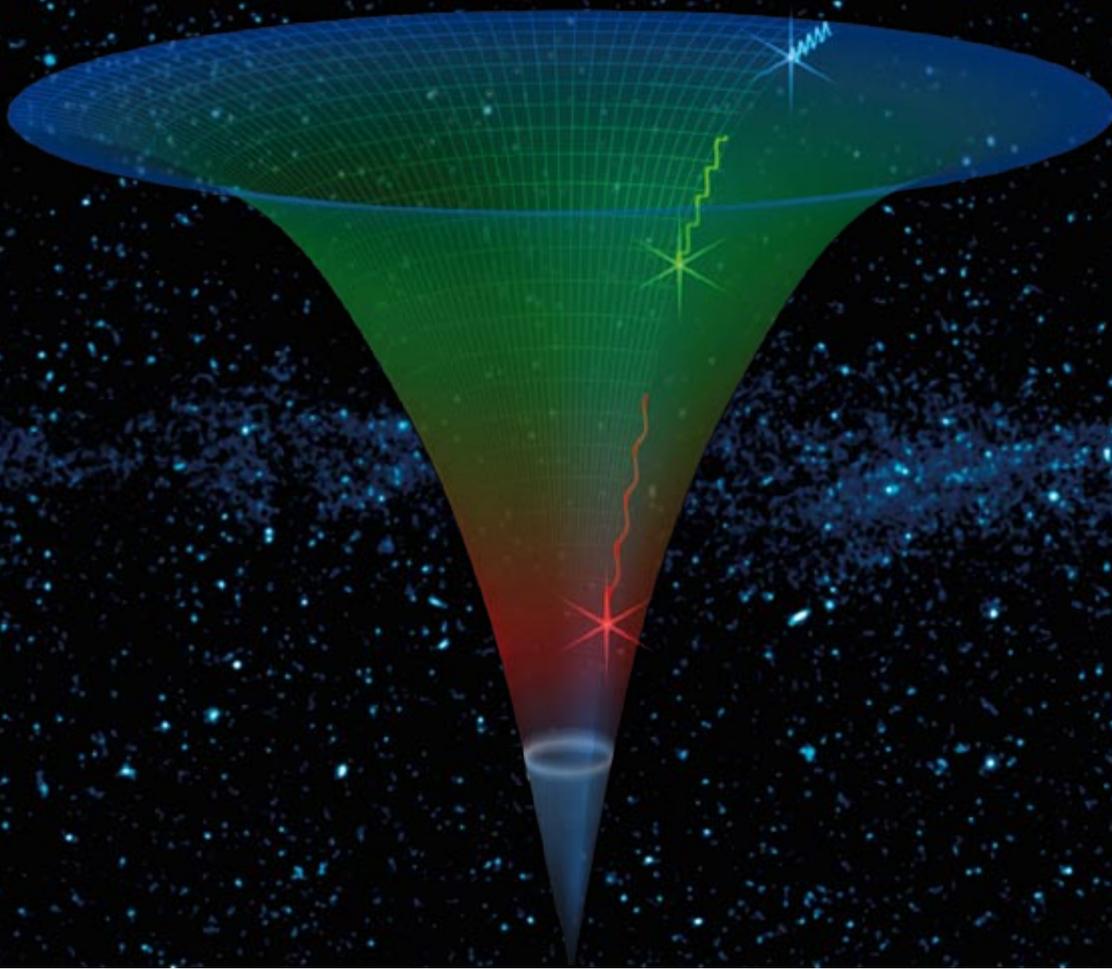
dad y el horizonte de sucesos se denomina agujero negro.

Dado que nada puede viajar más deprisa que la luz, todo lo que se encuentre entre la singularidad y el horizonte de sucesos quedará atrapado en la gravedad del agujero negro. Nuestro universo se encuentra, por tanto, aislado del interior de un agujero negro.

Si aceptamos que, según la conjetura de la censura cósmica de Roger Penrose, toda singularidad debe tener un horizonte de sucesos, o dicho de otra manera, no hay singularidades "desnudas", el precio por cruzar el horizonte de sucesos y observar de cerca la singularidad de un agujero negro será dejar por siempre nuestro universo. Nada impide que lleguemos hasta ella, pero nunca podremos volver y contar qué hemos visto.

Formación

Si una estrella llega a las últimas etapas de su vida con una masa superior a unas 2 o 3 veces la de nuestro Sol, nada parará su implosión cuando se le agote el combustible nuclear. Se contraerá más y más y la gravedad llegará a ser tan intensa que el espacio se curvará sobre sí mismo hasta generar la singularidad: se habrá formado un agujero negro y la luz de la estrella desaparecerá por siempre de nuestro universo.



NASA/CXC/GA/R. KRAFF ET AL. (Centaurus A); NASA/IPAC CALTECH (fondo de estrellas); WOLFGANG STEFFEN Y JOSE LUIS GÓMEZ FERNÁNDEZ (curvatura espacio-tiempo)

Si la primera mitad del siglo XX reveló la posible existencia de agujeros negros de tamaño estelar, la segunda mitad nos sorprendió más aún con la posibilidad de los agujeros negros supermasivos (ANSM), cuyas masas superaban la solar miles de millones de veces. Parecen ser los generadores de las mayores emisiones de energía conocidas en el universo: las de las galaxias activas, conocidas también por su acrónimo en inglés, AGN.

Recientes observaciones han mostrado que no sólo los AGN parecen contener un ANSM en su interior, sino que pueden estar presentes en todas las galaxias, incluida la nuestra. Sin embargo, aún desconocemos en gran medida cómo estos agujeros negros supermasivos se han formado en el corazón de las galaxias. Mientras algunas teorías apuntan hacia la posible formación de un ANSM como precursor de la galaxia, otras sugieren que el agujero y la galaxia comparten un origen y evolución común; el agujero negro supermasivo acumularía masa a medida que la galaxia creciese.

Esta última hipótesis se ha visto recientemente reforzada gracias a la correlación observada entre las propiedades a gran escala de las galaxias elípticas y las de los bulbos de las espirales con la masa de los agujeros negros centrales que contienen. La masa total de estrellas y su dispersión de velocidades son direc-

tamente proporcionales a la masa del agujero negro central.

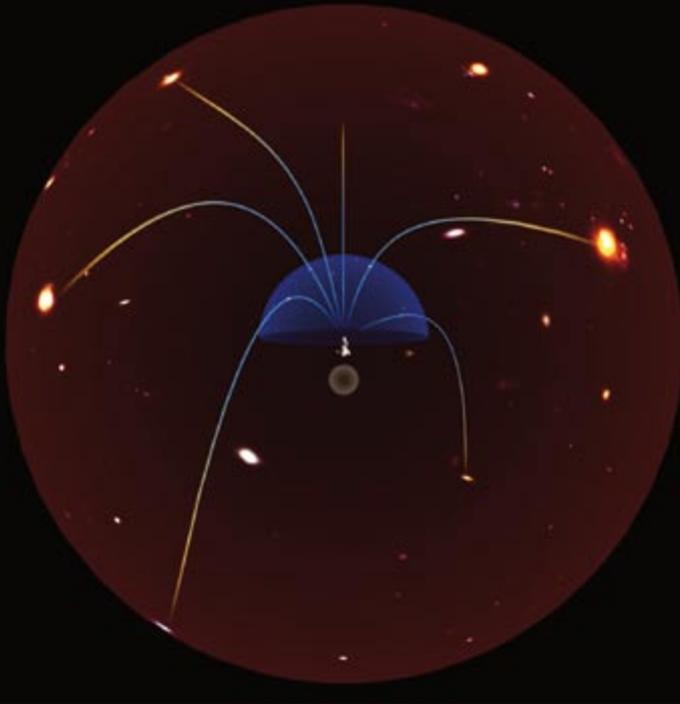
Viaje a un agujero negro

Una de las primeras pruebas de la presencia de un agujero negro con las que nos encontraríamos al acercarnos a uno de ellos sería la sombra negra que proyecta la región encerrada dentro de su horizonte de sucesos. El tamaño de esa región, proporcional a la masa del agujero negro, mide sólo unos tres kilómetros para un agujero negro de masa solar; la masa propiamente dicha quedaría confinada en una región de unos 10^{-33} cm.

La enorme curvatura producida por el agujero negro en la cercanía del horizonte de sucesos actúa a modo de lente, que hace que la sombra del agujero presente un borde brillante en el que se concentra la luz de las estrellas y galaxias situadas *detrás* del agujero negro. Al acercarnos al horizonte de sucesos, comenzaríamos a percibir unas fuerzas de marea, tanto mayores cuanto menor fuese el agujero negro y más cerca nos encontrásemos. Las fuerzas aludidas son el resultado de la rápida variación de la gravedad con la distancia al horizonte de sucesos; distintas partes de nuestro cuerpo experimentarían fuerzas gravitatorias de diferente intensidad.

Las ecuaciones de Einstein muestran que la gravedad no sólo afecta al espacio, curván-

1. CURVATURA DEL ESPACIO-TIEMPO producida por un agujero negro. Los fotones gastan energía (aumentan su longitud de onda y "enrojecen") al salir del pozo de potencial. De más allá del horizonte de sucesos, ni siquiera la luz consigue escapar.



2. EN LAS CERCANIAS DE UN AGUJERO NEGRO la luz del resto del universo se concentra en una ventana, tanto menor cuanto más nos acercamos al horizonte de sucesos.

dolo, sino que modifica también el tiempo. El espacio y el tiempo dejan de ser conceptos absolutos e independientes. El fluir del tiempo y del espacio es relativo y depende del observador; no podemos entender uno sin el otro: están integrados en el espaciotiempo. La gravedad de un agujero negro produce una curvatura en el espaciotiempo, por lo que, al acercarnos al horizonte de sucesos, el tiempo fluiría más lentamente para nosotros que para un observador lejano. Por eso, la frecuencia de los fotones que, emitidos por nosotros, captaría el observador distante se reduciría a medida que nos acercásemos al horizonte. Al disminuir su frecuencia, la luz se volvería más y más rojiza; por ese motivo, al fenómeno en cuestión se le denomina corrimiento hacia el rojo gravitatorio.

La dilatación del tiempo iría creciendo a medida que nos acercásemos al horizonte de sucesos, de suerte que, para un observador lejano, vendría a ser como si el tiempo de nuestros relojes se parase justo en el momento en que cruzásemos el horizonte. Le parecería que nunca llegaríamos a cruzarlo; nuestra imagen se le quedaría congelada para siempre en el momento de cruzar el horizonte.

En cuanto a nosotros, este viaje al agujero negro haría que el universo entorno se concentrase en una pequeña ventana circular. Sería como mirar a través del “embudo” producido por la curvatura en el espaciotiempo. A medida que nos acercásemos al agujero negro, la ventana decrecería, para desaparecer en el momento de cruzar el horizonte de sucesos.

El universo tal y como lo conocemos dejaría de estar a nuestro alcance; nos embarcaríamos en un viaje hacia lo desconocido en la vecindad de la singularidad, donde las leyes de la mecánica cuántica y la gravedad de Einstein se unen de una manera que desconocemos al día de hoy.

Los indicios

El principal problema a la hora de encontrar pruebas de la existencia de los agujeros negros es que, como hemos visto, no emiten ningún tipo de radiación; al menos, no en cantidad apreciable. La única radiación que pueden emitir es la propuesta por Stephen Hawking y que estaría originada por las fluctuaciones cuánticas del vacío. Esta es inversamente proporcional al tamaño del horizonte de sucesos del agujero negro por lo que sólo los *agujeros negros primordiales*, del tamaño de un núcleo atómico y formados presumiblemente en el origen del universo, emitirían una cantidad de energía reseñable. Tales agujeros diminutos, si llegaron a formarse, lo hicieron en un número muy pequeño; resultaría imposible encontrarnos uno de ellos. Cabría incluso que no obedecieran el principio de censura cósmica de Penrose y muestren su singularidad desnuda. El resto de los agujeros negros tienen una radiación de Hawking indetectable.

Ya que no podemos ver los agujeros negros, para detectar su presencia hemos de recurrir a las perturbaciones que introducen en su entorno. A la manera en que las pisadas en la nieve nos llevan a una persona, las huellas de los agujeros negros se dejan en su enorme gravedad.

Uno de los primeros indicios de la existencia de agujeros negros se obtuvo del estudio de los sistemas binarios de rayos X, formados por una estrella y un agujero negro de tamaño estelar. Ahora los mejores indicios de la existencia de agujeros negros han aparecido en el centro de las galaxias, incluida la nuestra. En estos casos, la huella gravitatoria corresponde a objetos del tamaño de cientos o miles de millones de estrellas.

El centro de nuestra galaxia parece albergar uno de estos ANSM. Gracias a su relativa proximidad (a tan sólo 27.000 ± 1100 años-luz), se ha podido determinar, con una extraordinaria precisión (0,3 milésimas de segundo de arco, equivalentes a $0,00003$ años-luz), el movimiento de las estrellas en torno a ese objeto central, que debe contener una masa total de $4,31 \pm 0,36$ millones de veces la de nuestro Sol. Además, la masa en cuestión ha de estar confinada en un espacio muy reducido, con una densidad de masa equivalente a la de 40 mil billones de estrellas de tipo solar, en un

tamaño algo menor que la distancia que nos separa de la estrella más cercana. Estas son las razones de que se crea que el objeto situado en el centro de nuestra galaxia constituya el que aporta más claros indicios de ser un gigantesco agujero negro.

Otro de los más firmes candidatos a ANSM es el situado en el centro de la galaxia NGC4258. Observaciones del movimiento de nubes de alta velocidad en torno al objeto central han permitido estimar que contiene una masa de 39 ± 3 millones de veces la del Sol. Es pequeña comparada con la obtenida para el centro de la galaxia denominada M87, situada en el centro del cúmulo de galaxias de Virgo: tres mil millones de veces la masa solar.

Agujeros negros supermasivos en el corazón de las galaxias

La presencia de un agujero negro supermasivo produce enormes alteraciones en las regiones internas de la galaxia que lo alberga. Su gran masa da lugar a la formación de inmensos discos de gas y polvo que giran a su alrededor.

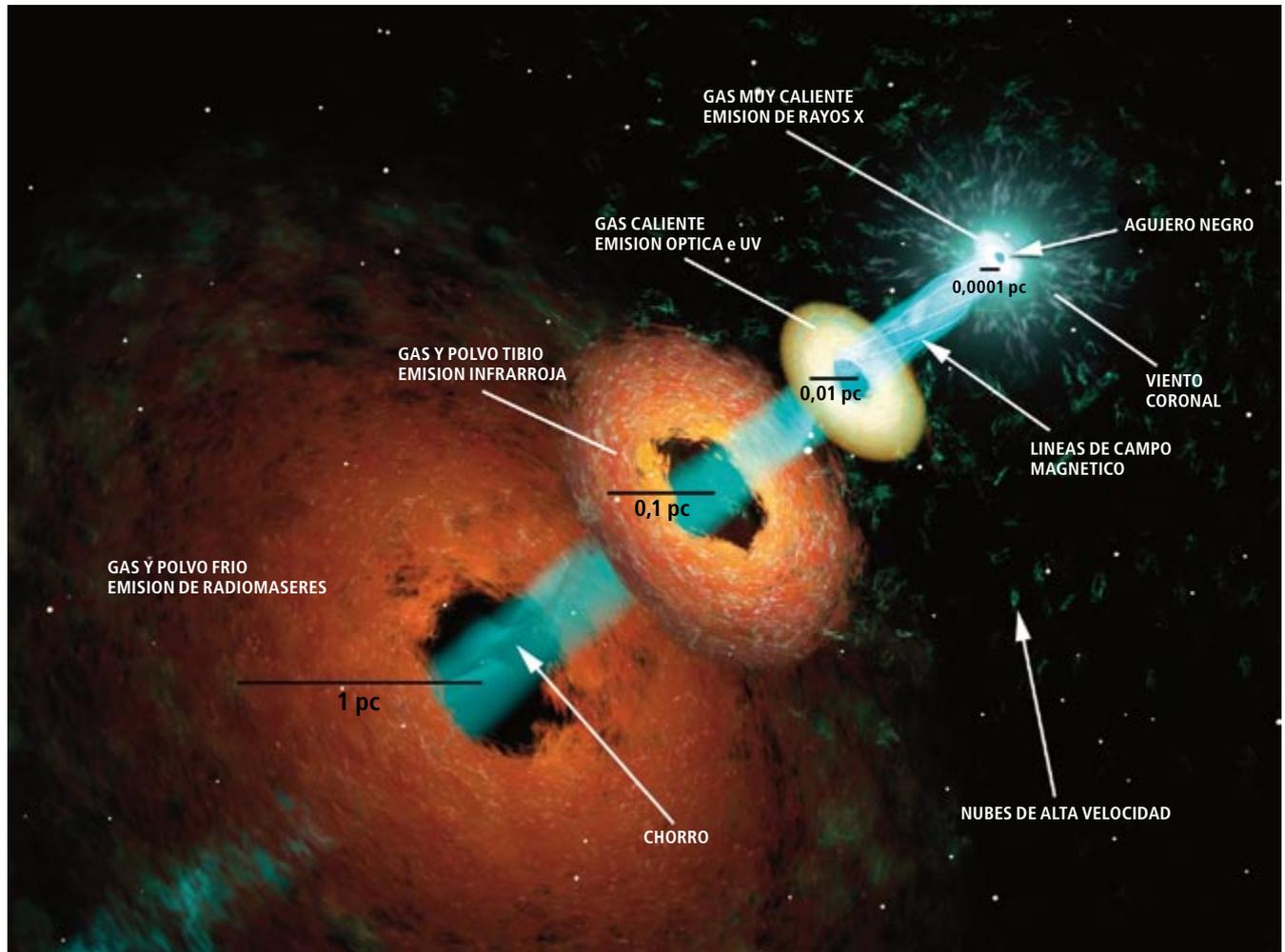
En la figura 3 se muestra una imagen esquemática de la región más interna de un AGN. En ella se distinguen las zonas del disco de acrecimiento, según la región del espectro electromagnético en que se emita la mayor cantidad de radiación. Las “nubes”, condensaciones de material interestelar, giran también alrededor del agujero negro a velocidades del orden de miles de kilómetros por segundo.

Debido a su mayor proximidad con respecto al agujero negro central, las regiones más internas del disco giran con una mayor velocidad, creándose una rotación diferencial en el disco en función de su distancia al centro. Se produce así una fricción y, por tanto, calentamiento, que se disipa en forma de emisión a lo largo del espectro electromagnético. Cuanto más cerca nos encontremos del agujero negro, más altas serán las temperaturas del disco y, por consiguiente, más energética la radiación emitida.

El disco de acrecimiento empieza a tomar forma a unos pocos parsecs (1 pc es equivalente a 3,26 años-luz), donde nos encontramos una mezcla de gas y polvo a muy baja temperatura, detectable sólo por su radiación

3. ESQUEMA DE UN NUCLEO ACTIVO DE GALAXIAS.

El agujero negro central da lugar a un disco de acrecimiento que exhibe una estratificación en temperaturas. El material extraído del disco engendra chorros que transportan partículas atómicas a energías y velocidades relativistas. Para mayor simplicidad, se muestran distintas secciones del disco separadas a lo largo del chorro.



en líneas moleculares correspondientes a longitudes de onda de radio. La observación de estas líneas nos faculta para medir la velocidad del material en el disco con una gran precisión a través del efecto Doppler.

Adentrándonos más en el disco, hasta distancias de décimas de parsec del agujero negro, nos encontramos con una región de gas y polvo tibio que emite sobre todo en el infrarrojo. A unas centésimas de parsec, el disco está lo bastante caliente como para que se evaporen los minúsculos granos de polvo; emite sobre todo en el óptico y el ultravioleta. Se trata de una región que, si bien del tamaño de nuestro sistema solar, emite una cantidad de energía cien veces mayor que todas las estrellas de la galaxia.

Adentrándonos más aún en el disco llegamos a una zona donde el gas alcanza temperaturas de millones de grados; emite rayos X. Más cerca del agujero negro no existen órbitas estables, por lo que el material atraviesa el horizonte de sucesos y desaparece atrapado por el agujero negro.

Pero no todo el material del disco acaba alimentando al agujero negro. Parte es arrancado del disco por los campos magnéticos que se encuentran anclados en el interior de éste, desencadenando uno de los fenómenos más llamativos de la naturaleza: unos gigantes chorros de partículas que se extienden a velocidades cercanas a la de la luz hasta distancias mucho mayores que la propia galaxia que los alberga. Esos chorros constituyen una de las características más espectaculares

de los cuásares y una de las mejores fuentes para su estudio.

La primera observación de un chorro aconteció en 1917. La realizó Heber D. Curtis en M87. A pesar de esta primera detección en el óptico, fueron necesarios otros 60 años para que se desarrollara la radioastronomía y con ella un mejor conocimiento de la naturaleza de los chorros y su relación con los AGN.

Radiointerferometría

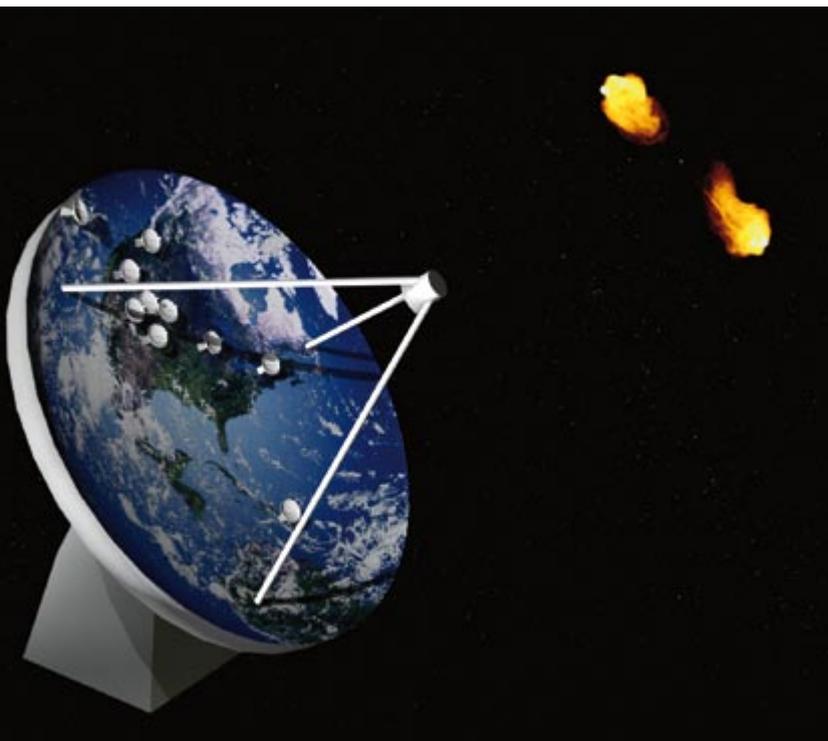
La mayor parte de la radiación emitida por los chorros de los AGN se concentra en las longitudes de onda milimétricas y centimétricas, es decir, en el rango de las emisiones de radio. Semejante acotamiento supuso inicialmente un inconveniente, dada la pobre resolución de los radiotelescopios comparada con la de los telescopios que observan las longitudes de onda del visible.

El poder resolutivo de un instrumento que trabaja en el límite de difracción viene dado, aproximadamente, por la razón entre la longitud de onda de la observación y la apertura del instrumento. Así, para obtener imágenes con una resolución angular de 1 segundo de arco en el óptico (alrededor de los 550 nm) necesitaríamos un telescopio de unos 14 cm, mientras que a longitudes de onda de radio (alrededor de 1 cm) tendría que ser de unos 2,5 km de diámetro. Esto hizo pensar que la radioastronomía estaría siempre relegada a un papel secundario frente a la astronomía óptica.

La solución del problema provino del desarrollo de una técnica de observación, la *interferometría*. Por esta idea de brillante simplicidad obtuvo Martin Ryle el premio Nobel de física en 1974. No podemos construir una antena de varios kilómetros de diámetro, pero sí múltiples antenas y combinarlas, conjugar sus señales como si fuesen secciones distintas de una mucho mayor, tan grande como la máxima separación entre ellas. Mediante semejante proceder se consigue una resolución igual a la que se obtendría con esa antena equivalente, aunque no la misma sensibilidad. Para que la sensibilidad fuese igual, sería necesario que las antenas del sistema interferométrico cubriesen entre todas el área de la antena equivalente; en la práctica resultaría tan difícil y costoso como construir una única antena.

Martin Ryle se percató entonces de la posibilidad de registrar la señal recibida en cada antena durante un largo período de tiempo; de ese modo, la propia rotación de la Tierra propicia que las antenas (o elementos del interferómetro) cubran una mayor superficie de la antena equivalente. Dicho técnicamente: así se obtiene un mejor cubrimiento del denominado

4. LAS OBSERVACIONES INTERFEROMETRICAS permiten combinar la señal de distintos radiotelescopios como si se tratase de una sola antena, tan grande como la propia Tierra.



plano $u-v$, que no es más que la representación de la superficie de la antena equivalente.

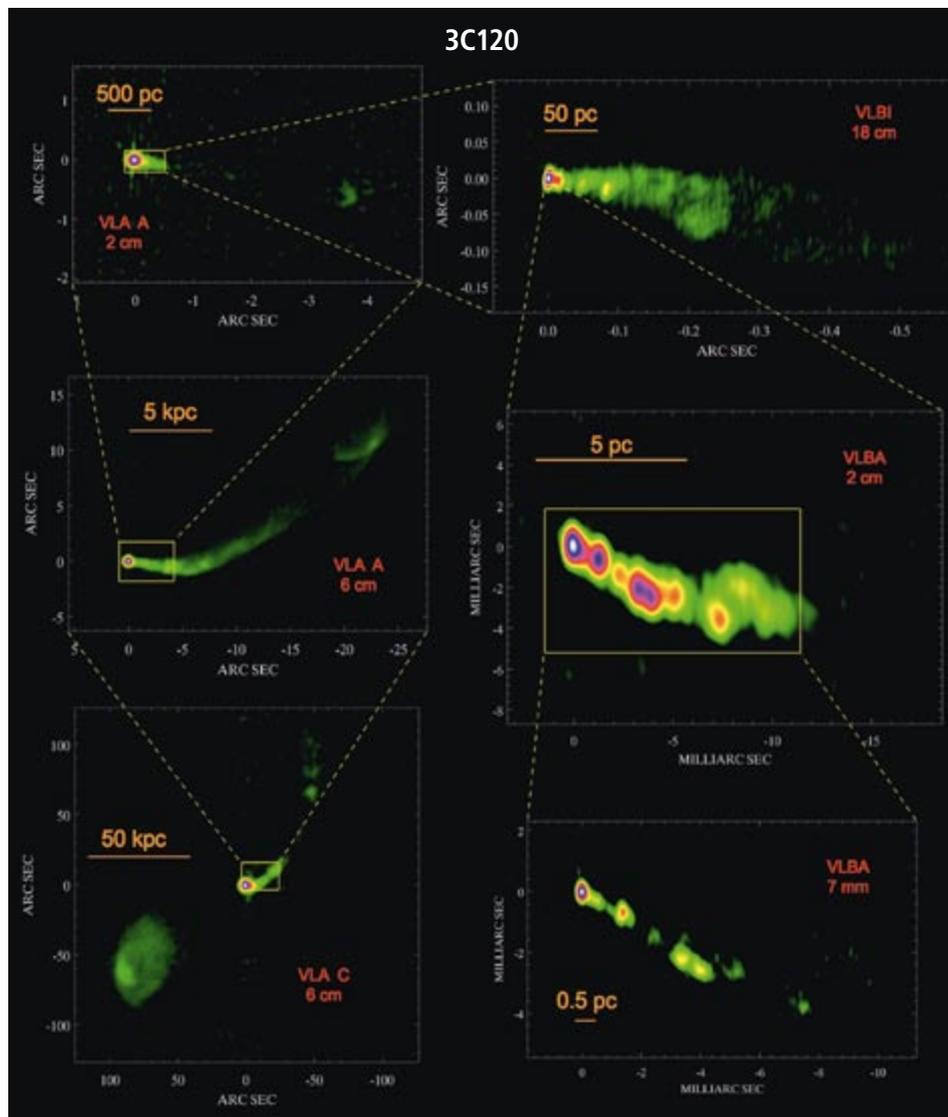
Las señales de las distintas antenas se combinan como en el interferómetro de Michelson. La señal que se recibe en cada antena se procesa en el correlador, dispositivo que compensa el retraso en la llegada de la señal a cada una de las antenas, para lo cual requiere de un modelo complejo de todas las variables que pueden influir; por ejemplo, la propia rotación terrestre. El correlador construye el patrón de interferencias, o función de visibilidad (amplitud y fase), para cada par de antenas (para cada “línea de base”). Esta técnica es conocida como interferometría de muy larga base (VLBI, por su acrónimo en inglés).

Uno de estos interferómetros es el VLBA, consistente en 10 radiotelescopios de 25 metros cada uno repartidos por Estados Unidos, desde Hawaii hasta las islas Vírgenes. Con este instrumento es posible sintetizar una antena equivalente tan grande como la propia Tierra; así se obtienen imágenes a longitudes de onda de radio con una resolución angular del orden de 0,15 milisegundos de arco. Tamaña capacidad de observación no tiene comparación en otras ramas de la astronomía; es, por ejemplo, unas 500 veces superior a la obtenida con el telescopio espacial Hubble en longitudes de onda del visible.

La radiogalaxia 3C120

Uno de los objetos más interesantes para profundizar en el conocimiento de los chorros en AGN y su relación con los ANSM que albergan es la radiogalaxia 3C120. Esta galaxia se caracteriza por emitir una enorme cantidad de radiación a lo largo del espectro electromagnético, desde longitudes de onda de radio hasta rayos X, con luminosidades que superan los 10^{43} erg s^{-1} (unos dos mil quinientos millones de veces mayores que la de nuestro Sol). Se debe semejante cantidad de energía a la acreción de material galáctico en torno a un agujero negro central que tiene una masa unos 30 millones de veces la solar.

Las primeras observaciones de interferometría a longitudes de onda de radio, llevadas a cabo en los años ochenta, revelaron que 3C120 presenta un chorro que se extiende hasta distancias del orden de 100 Kpc, muy superiores al tamaño en el óptico de la propia galaxia que lo contiene. Este chorro, al que podemos considerar representativo de los que hay en los AGN y en los sistemas binarios —de estrella y un objeto muy compacto, quizás un agujero negro— a los que se llama microcuásares, transporta materia y energía desde las regiones más centrales de la galaxia hasta el medio intergaláctico. A lo largo de esas distancias enormes,



los chorros se mantienen muy colimados, con ángulos de apertura que en la mayoría de los casos es inferior a un grado.

Gracias al análisis del espectro de emisión, es decir, de cómo varía ésta en función del rango de energía considerado, podemos descubrir el mecanismo por el que los chorros emiten grandes cantidades de energía en longitudes de onda de radio. La mayoría suele mostrar un espectro bastante plano: emiten una cantidad de energía muy similar, independientemente de la longitud de onda de radio a la que observemos. Esta distribución difiere de la esperada para un cuerpo negro, un objeto con una emisión característica determinada por la temperatura a la que se encuentre; es, por ejemplo, el caso de una estrella. De ahí que se diga que la emisión de los chorros es de naturaleza no térmica.

Sin embargo, el espectro se ajusta bien al esperado para una radiación de tipo sincrotrón, la radiación que emiten las partículas cargadas muy energéticas cuando se hallan

5. IMAGENES DEL CHORRO RELATIVISTA de la radiogalaxia 3C120 a diferentes escalas angulares.

inmersas en un campo magnético. La cantidad de energía emitida es inversamente proporcional a la masa de la partícula elevada a la cuarta potencia. Por tanto, la mayor parte de la radiación sincrotrón que proviene de los chorros tiene que haber sido producida por electrones de muy altas energías que viajan a lo largo de los chorros, que a su vez contienen un campo magnético.

Una de las características de la radiación sincrotrón estriba en lo siguiente: la energía liberada por el electrón, así como la frecuencia a la que la emite en su mayor parte, es proporcional a su energía inicial. Se configura así una estratificación en el chorro, tanto en la cantidad de energía como en la frecuencia a la que es emitida. Las regiones más internas desprenden una gran cantidad de energía, y lo hacen fundamentalmente mediante fotones de energías muy altas, correspondientes a longitudes de onda del óptico, o incluso en rayos X. A medida que los electrones viajan a lo largo del chorro y van perdiendo energía, radian cada vez menos energía y lo hacen a longitudes de onda crecientes.

La estructura más interna de los chorros, su “núcleo”, presenta por lo general una emisión ópticamente “gruesa”. Quiere decir que la mayor parte de la emisión que se genera en esta región es absorbida por la propia fuente. Sólo la emisión generada en las capas más externas puede escapar y llegar hasta nuestros radiotelescopios. De esta manera, al igual que una espesa niebla no nos permite ver qué hay detrás, la fuerte autoabsorción de la emisión en el núcleo nos impide observar sus capas más internas. Por eso, resulta más difícil analizar cuáles son los procesos físicos desarrollados en esa región, que presenta un interés especial,

pues ahí se generan los chorros. A medida que vamos recorriendo el chorro, alejándonos del núcleo, vemos que éste suele presentar unas regiones de emisión más intensa; se les da el nombre de *componentes*.

¿Velocidades mayores que la de la luz?

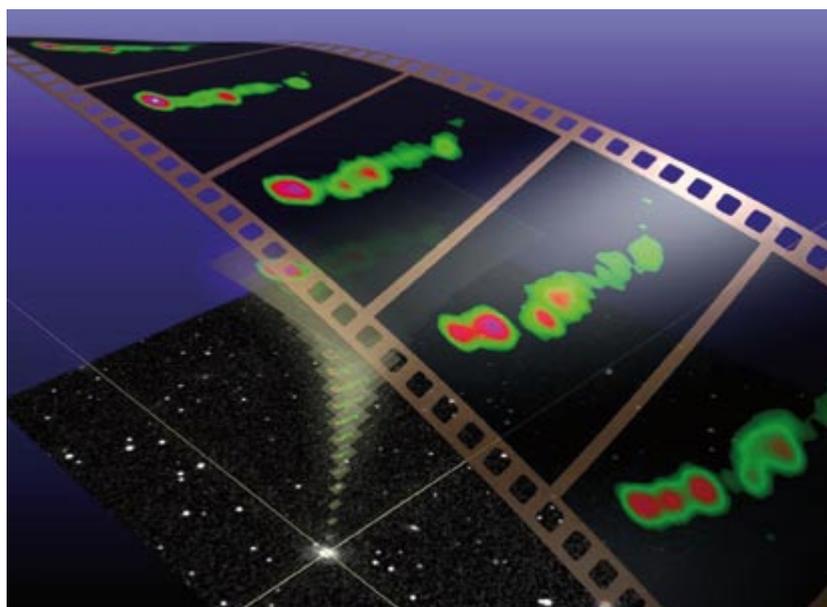
Gracias a la relativa cercanía de la radiogalaxia 3C120, situada a sólo unos 125 Mpc, las observaciones de interferometría de muy larga base con el VLBA a una longitud de onda de 7 mm nos permiten estudiar el chorro de 3C120 con una resolución espacial de unos 0,07 pc. Para hacernos una idea de la óptima resolución alcanzada: con ella apreciaríamos los detalles de un balón de baloncesto situado en la Luna. Podemos así acercarnos a las regiones más internas del chorro de 3C120 y estudiar su evolución en el transcurso del tiempo. Gracias a este tipo de observaciones, uno de los autores (Gómez) y sus colaboradores han realizado un seguimiento mensual durante casi dos años del chorro de 3C120. De ese empeño salió uno de los estudios más detallados hasta la fecha sobre dichos objetos.

Las regiones de emisión más intensa, o “componentes”, del chorro muestran un comportamiento característico de estas fuentes, pero no por ello menos intrigante: su movimiento proyectado en el plano del cielo es mucho más rápido que la luz. La primera vez que se observó el *movimiento superlumínico*, en los años setenta, se pensó que violaba la teoría de la relatividad de Einstein. Sin embargo, es perfectamente explicable dentro de la teoría de la relatividad, y nos ha permitido constatar un hecho de suma importancia en el estudio de los chorros en AGN: el material que viaja a lo largo de los chorros ha de hacerlo a una velocidad que, si bien no es superior a la velocidad de la luz, ha de hallarse muy cercana a la misma (del orden del 90 % o superior); además, ha de viajar en una dirección cercana a la de la visual.

Los ANSM y su entorno

El estudio detallado de la evolución de la estructura del chorro en la radiogalaxia 3C120 ha puesto de manifiesto la importancia de su interacción con el medio a través del cual se propaga. Como ya hemos dicho, se trata de un medio poco homogéneo, con regiones de mayor densidad, o nubes, que orbitan en torno al agujero negro central supermasivo. El ingente pozo de potencial del agujero negro hace que las nubes más internas presenten elevadas velocidades de rotación; se crean así nubes de alta velocidad, responsables de líneas de emisión con amplias anchuras re-

6. OBSERVACIONES DE RADIO-INTERFEROMETRIA permiten estudiar la evolución temporal de la emisión en el chorro de la radiogalaxia 3C120 con una resolución angular hasta 500 veces mejor que la ofrecida por el telescopio espacial Hubble en el rango óptico.



MOVIMIENTO SUPERLUMINICO

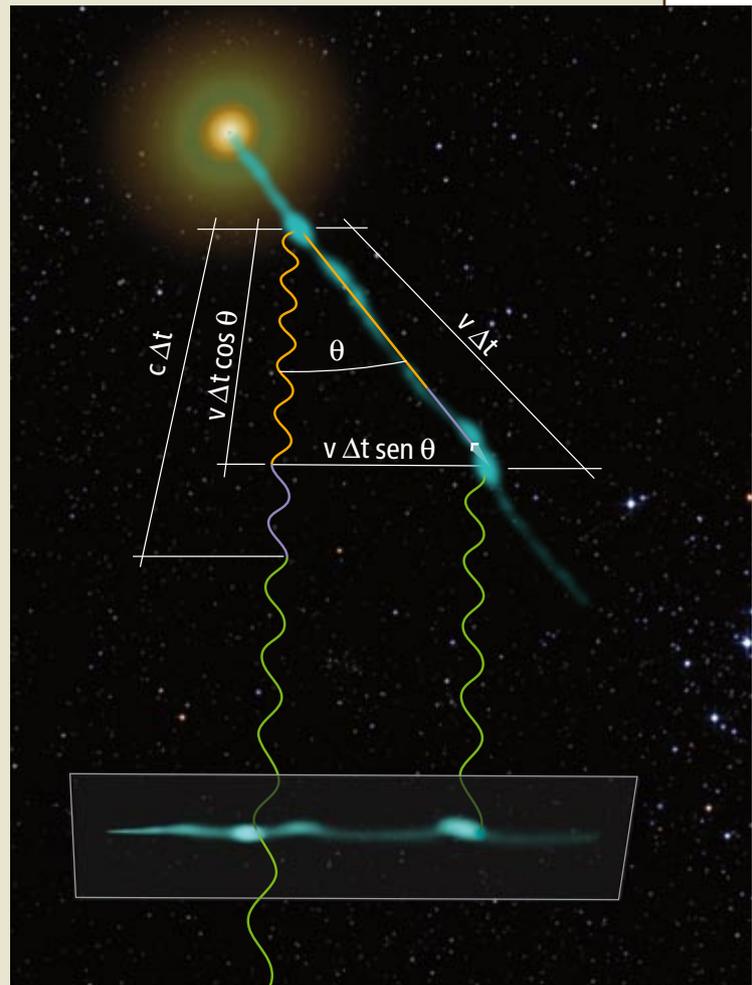
Cuando medimos, en los chorros relativistas, movimientos proyectados en el plano de observación, sus velocidades pueden superar la velocidad de la luz. Se habla entonces de movimientos superlumínicos, sin que por ello se viole una de las premisas fundamentales de la teoría de la relatividad: nada puede viajar más rápido que la luz.

Consideremos una región de emisión (una "componente") que viaja a lo largo del chorro con una velocidad v (cercana a la de la luz) y formando un ángulo pequeño θ con respecto al observador. Emite dos pulsos de luz separados por un intervalo de tiempo Δt , como se muestra en la figura. El primer pulso de luz viaja hacia el observador a la velocidad de la luz c : recorre durante este intervalo una distancia $c\Delta t$ en su camino hacia el observador. Mientras tanto, la componente se mueve a lo largo del chorro a una velocidad muy cercana a c ; por eso, cuando emite el segundo pulso de luz Δt más tarde, ya ha recorrido una distancia en dirección al observador que viene dada por su proyección en esa dirección, igual a $v\Delta t \cos \theta$. De ese modo, el segundo pulso ha de recorrer una distancia hasta el observador menor que el primero, dada por $c\Delta t - v\Delta t \cos \theta$ (en azul en la figura). Esto supone que los pulsos de luz llegarán al observador con una diferencia de tiempos igual a la que necesita la luz para viajar esta distancia, que es igual a $(c\Delta t - v\Delta t \cos \theta)/c$, o lo que es lo mismo $\Delta t(1 - \beta \cos \theta)$, en donde $\beta = v/c$.

Esto nos permite calcular fácilmente la velocidad aparente v_{ap} medida por un observador en el plano del cielo: es igual a la distancia recorrida por la componente proyectada en el plano de observación, igual a $v\Delta t \sin \theta$, dividida por la diferencia en los tiempos de llegada de los dos pulsos de luz que hemos calculado antes: $\Delta t(1 - \beta \cos \theta)$. Por tanto $v_{ap} = (v \sin \theta)/(1 - \beta \cos \theta)$, o en unidades de la velocidad de la luz (dividiendo por c) $\beta_{ap} = (\beta \sin \theta)/(1 - \beta \cos \theta)$.

Es fácil, por tanto, ver que, dependiendo de la velocidad del material en el chorro y de su orientación relativa con respecto al observador, podemos llegar a medir velocidades proyectadas en el plano del cielo mayores que la de la luz. Por ejemplo, para una componente que se mueva, con un ángulo con respecto al observador de 20° , a una

velocidad de $\beta = 0,9$ (es decir, el 90 % de la de la luz) mediríamos una velocidad proyectada en el plano de observación de aproximadamente el doble de la velocidad de la luz. Se han llegado a medir en chorros de AGN velocidades superlumínicas de hasta unas 40 veces la de la luz.

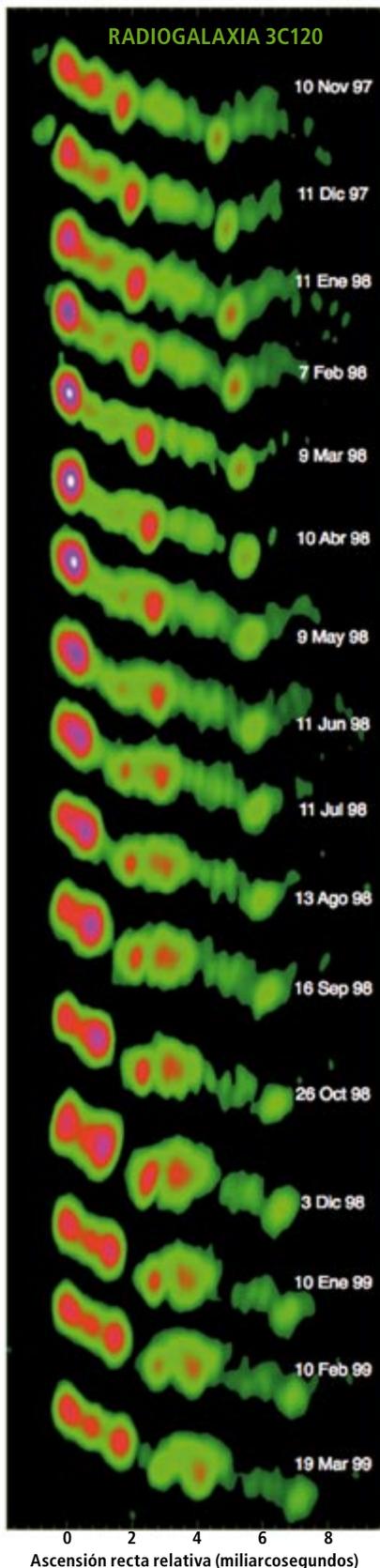


lativas. En las partes más alejadas, tenemos nubes de menor velocidad y densidad, con líneas de emisión más estrechas. Aunque se desconoce la distribución de estas nubes, se espera que tengan unas densidades lo suficientemente grandes para que la probabilidad de colisión del chorro con una resulte bastante alta.

El análisis de la evolución de la emisión por parte de algunas componentes del chorro 3C120 muestra indicios de una intensa interacción con una nube de éstas. Contrariamente a lo esperado, la emisión de algunas de estas componentes presenta un aumento brusco cuando se encuentran en una región del chorro situada a unos 8 pc del núcleo. El aumento, que acontece en sólo unos meses, viene acompañado por una reordenación y rotación progresiva del campo magnético.

Para explicar estos cambios necesitamos que una región del chorro, o componente, colisione con una nube. Durante la colisión se produce una onda de choque, que aumenta la energía de los electrones del chorro, así como su densidad. Esta onda de choque debe al mismo tiempo producir una realineación del campo magnético, lo cual explicaría el aumento en la emisión linealmente polarizada. Si el aumento brusco de la emisión es inusual, lo es también su repentina disminución. Para poder explicarla ha de haber una opacidad extra, procedente probablemente de la propia nube.

Podemos hacer una estimación de cuáles son los parámetros esperados para esta nube a partir de las variaciones en la emisión, tanto en flujo total como en el linealmente polarizado. A partir de la medida de la rotación y de la



opacidad calculada, podemos establecer la columna de densidad necesaria: se obtienen unos valores intermedios entre los que se calculan para las regiones de nubes de líneas anchas y los de las nubes de líneas estrechas. Por tanto, el chorro se hallaría interactuando con una nube de un tamaño de unos 0,5 pc, con una densidad electrónica de unos $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ y un campo magnético de unos 0,4 microgauss.

Formación de los chorros

Aún desconocemos en gran medida cómo el sistema constituido por el agujero negro y su disco de acrecimiento propicia la formación en los AGN de un par de chorros que transportan materia y energía en sentidos opuestos a lo largo del eje de rotación del agujero negro. Sin embargo, se trata de un proceso harto común en la naturaleza: no sólo se da en los AGN, sino también en estrellas en formación, púlsares y microcuásares y, probablemente, en las erupciones de rayos gamma, es decir, en los sistemas donde se produce acreción de materia en torno a un objeto masivo central. Parece que estas distintas situaciones astrofísicas comparten una misma regla: la velocidad del material que forma los chorros es cercana a la velocidad de escape del sistema. Puesto que para un agujero negro la velocidad de escape es la velocidad de la luz, los chorros que se observan en los AGN, y en otros sistemas con un agujero negro central, suelen presentar una velocidad cercana a esa velocidad límite de la naturaleza.

Las observaciones de la radiogalaxia 3C120 nos permiten indagar en los procesos que dan lugar a la formación de los chorros. Su espectro de emisión en rayos X se caracteriza por una componente débil (es decir, de energías relativamente bajas) originada en las zonas más internas del disco de acrecimiento, junto con una componente más energética proveniente de una corona de electrones de muy alta energía, que reprocesan la emisión del disco. A ello debemos añadirle una línea de emisión de hierro que sugiere que la emisión del disco de acrecimiento es mucho más intensa que la que se origina en las regiones más internas del chorro.

Por tanto, si observamos la radiogalaxia 3C120 en rayos X estaremos observando las zonas internas del disco de acrecimiento, mientras que si lo hacemos en longitudes de onda de radio estaremos captando fundamentalmente la emisión que proviene del chorro. Observacio-

7. SECUENCIA DE IMAGENES del chorro en la galaxia 3C120 obtenidas con el radiointerferómetro VLBA. Estas muestran regiones de emisión con velocidades en el plano del cielo entre 4 y 5 veces mayores que la de la luz.

nes simultáneas en ambas regiones del espectro electromagnético deberían, por consiguiente, proporcionarnos información sobre la posible conexión entre el disco y el chorro.

Con este fin, Alan P. Marscher, de la Universidad de Boston, y sus colaboradores (entre los que se encuentra uno de los autores, Gómez) han llevado a cabo una campaña de observaciones de 3C120 en rayos X con el RXTE (satélite Rossi para la observación de rayos X) y, simultáneamente, con los radiotelescopios de la Universidad de Michigan, Metsähovi (en Finlandia) y el radiointerferómetro VLBA. Tras más de tres años de observaciones, se ha podido comprobar que la emisión en rayos X (en el rango entre 2,4 y 20 keV) de 3C120 suele presentar disminuciones en su intensidad, siempre seguidas, alrededor de un mes más tarde, de un aumento de la emisión a longitudes de onda de radio.

Según algunas hipótesis, la bajada en la emisión en rayos X puede deberse a una disminución en la eficiencia con la que el disco emite radiación, relacionada con cambios en la configuración de su campo magnético. Por otro lado, es posible que la bajada en la emisión en rayos X obedezca a una disminución en la cantidad de materia que emite en rayos X en las zonas más internas del disco de acrecimiento. Es decir: una sección más interna del disco “desaparece”. La pregunta, por tanto, es: ¿adónde va? Dada su cercanía al horizonte de sucesos del agujero negro central, y puesto que el material que cruza este horizonte deja de ser visible desde nuestro universo, la hipótesis más razonable es que la materia que desaparece lo hace porque la engulle el agujero negro.

De manera sistemática, la bajada en rayos X viene seguida por un aumento en la emisión en radio, que, como sabemos, se origina sobre todo en los chorros. Por lo tanto, no todo el material que desaparece de la zona más interna del disco es engullido por el agujero negro; una parte debe inyectarse en los chorros que observamos en radio. Si la hipótesis esbozada es correcta, las imágenes de interferometría deberían mostrar la aparición de nuevas componentes en el chorro mejor orientado con respecto al observador; y eso es justamente lo que muestran las observaciones realizadas con el VLBA. Nuevas componentes superlumínicas aparecen en el chorro cada vez que baja la emisión en rayos X, y producen el aumento en la emisión en longitudes de onda de radio.

Las componentes presentan una velocidad media del orden de cinco veces la velocidad de la luz. Por tanto, en un mes, entre la disminución de la emisión en rayos X y su aparición en el chorro, viajan una distancia, proyectada en el plano del cielo, de unos 0,15 mili-

segundos de arco. De ello se sigue que el agujero negro no se encuentra exactamente donde se origina el chorro, sino que hay una región entre el agujero y el chorro en la que éste es a todos los efectos invisible, y no por opacidad alguna, sino quizá porque el material que lo forma necesita cierta distancia hasta alcanzar una energía lo bastante alta para que la radiación procesos de tipo sincrotrón e inverso Compton (en el que los fotones ganan energía a expensas de la materia) y resulte observable por nuestros telescopios.

La correlación observada entre la emisión en rayos X y radio en 3C120 viene a confirmar nuestra suposición de que los chorros que observamos se generan en la acreción de material en torno a un objeto central compacto de enorme masa que debe de poseer un horizonte de sucesos. Ahora bien, la posesión de un horizonte de sucesos distingue a los agujeros negros frente a otros pozos de potencial gravitatorio intenso. Nos encontramos, pues, con una de las pruebas más claras de la existencia de un agujero negro supermasivo en el corazón de una galaxia activa.

Con anterioridad, habían observado un comportamiento muy similar Félix Mirabel, hoy en el Observatorio Europeo del Sur, y Luis F. Rodríguez, de la Universidad Autónoma de México, en el microcuásar GRS1915+105. En este caso, la masa del agujero negro responsable de la actividad del sistema es de “tan sólo” unas 10 veces la del Sol, es decir, unos 3 millones de veces menor que en 3C120. Esta razón entre las masas de los agujeros negros parece determinar el “factor de escala” entre ambos sistemas, algo esperable por otro lado, pues el factor en cuestión debe guardar relación con la razón de tamaños de los correspondientes horizontes de sucesos, que a su vez es directamente proporcional a la masa de los agujeros negros. Los microcuásares que encontramos en nuestra propia galaxia parecen ser una versión a escala reducida de los enormes AGN que encontramos repartidos por el universo. En cierta medida, constituirían una especie de pequeños laboratorios donde se podría estudiar en intervalos de minutos lo que requeriría años de observación en los cuásares.

Fotografiar un agujero negro

Probablemente, uno de los mayores retos de los próximos años será el de obtener imágenes directas del horizonte de sucesos de un agujero negro. Se trataría, sin duda, de una de las pruebas más claras de la existencia de estos objetos, a la vez que supondría uno de los mejores laboratorios para comprobar las predicciones de la teoría de la relatividad de Einstein.

Como hemos visto, uno de los lugares más prometedores para un estudio así es el propio centro de nuestra galaxia. Imágenes con la mejor resolución angular disponible en la actualidad, del orden de 100 microsegundos de arco, nos acercan al horizonte de sucesos a una distancia igual a unas decenas de veces su tamaño. La imagen directa de la enorme distorsión producida en el espaciotiempo que rodea al agujero negro se encuentra, por tanto, a sólo un orden de magnitud de mejora de la resolución angular alcanzada.

Según lo expuesto, tamaño capacidad de resolución angular es posible gracias a observaciones de interferometría de muy larga base creadas por la combinación de radiotelescopios repartidos por toda la superficie terrestre. El salto extra en resolución angular, hasta alcanzar los 10 microsegundos de arco (o menor), requiere de un aumento en la apertura del interferómetro (de la distancia máxima entre las antenas que lo forman) o de una disminución en la longitud de onda de observación.

La primera de tales opciones alternativas nos llevaría necesariamente a utilizar antenas en órbita terrestre; combinadas con las situadas en la superficie, nos permitirían extender la apertura del interferómetro hasta distancias superiores al tamaño de la Tierra. Nos referimos a una vía explorada ya con éxito por la agencia espacial japonesa, que en 1997 puso la antena de 8 metros de diámetro HALCA en una órbita con un apogeo de 21.400 km. Supone un aumento en un factor de aproximadamente tres en la distancia máxima entre

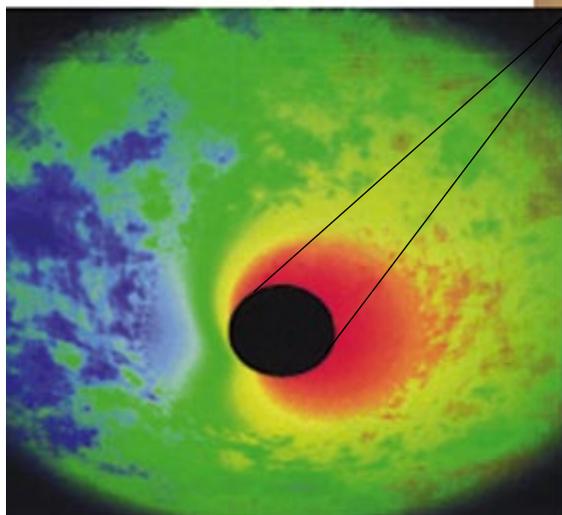
Los autores

José Luis Gómez Fernández y **Wolfgang Steffen** estudian los chorros relativistas presentes en núcleos de galaxias activas y otros flujos astrofísicos. Gómez es científico titular del Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC), en Granada, donde realizó su tesis doctoral, tras la que completó su formación en el Instituto de Astrofísica de la Universidad de Boston y el departamento de astronomía de la Universidad de Manchester. Steffen realizó su tesis doctoral en el Instituto de Radioastronomía de la Sociedad Max Planck, en Bonn, y completó su formación en el departamento de astronomía de la Universidad de Manchester, siendo actualmente investigador titular del Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México, en su sede de Ensenada.



8. LOS CAMPOS MAGNETICOS anclados en el disco de acrecimiento transfieren parte de su energía a los chorros relativistas.

9. MAXIM, al multiplicar por un millón la resolución del Telescopio Espacial Hubble, ampliaría las imágenes que éste ofrece (*derecha*) del núcleo de la galaxia M87, hasta el punto de que el agujero negro que debe de encontrarse allí, y del que parte el chorro de partículas visible en la imagen del Hubble, se percibiría como en la ilustración inferior.



permitiría alcanzar una resolución angular de 0,1 microsegundos de arco. El interferómetro está ideado para poder observar los rayos X emitidos por las zonas más internas de los discos de acrecimiento en torno a agujeros negros supermasivos justo cuando el material alcanza el horizonte de sucesos y su imagen se queda congelada en el tiempo antes de que lo engulla el agujero negro.

Una vía alternativa a la observación directa de un agujero negro consiste en la detección de las huellas que deja su enorme gravedad. Variaciones bruscas en la gravedad, como las producidas en sistemas binarios de agujeros negros, generan ondulaciones del propio espaciotiempo, similares a las que observamos en un estanque al lanzar una piedra. La detección de estas *ondas gravitatorias* abriría una ventana novedosa a nuestra forma de ver el cosmos. Con este fin, la ESA y la NASA están desarrollando conjuntamente el proyecto LISA (“Antena Espacial de Interferometría por Láser”), cuyo lanzamiento está previsto para 2012. Contará con tres telescopios en órbita solar separados 5 millones de kilómetros. Podrá detectar, por vez primera, las ondas gravitatorias producidas por la formación de agujeros negros, su coalescencia en sistemas binarios e incluso las fluctuaciones gravitatorias generadas en la propia formación del universo.

Los avances realizados en los últimos decenios nos permiten ser optimistas acerca de la posibilidad de resolver cuestiones fundamentales asociadas con la naturaleza de los agujeros negros supermasivos, como su formación y su relación con el entorno galáctico. Sobre esos fundamentos avanzaremos en el conocimiento de la formación de los chorros relativistas y sabremos por qué algunos convierten a su galaxia anfitriona en un AGN, mientras otros parecen estar en una situación de letargo, de baja actividad, como el situado en el centro de nuestra galaxia.

las antenas del interferómetro. Sin embargo, este aumento de la separación entre antenas no se ha podido trasladar a un aumento en la resolución angular, pues la mínima longitud de onda a que podía operar HALCA es de 6 cm, muy superior a la longitud en que pueden trabajar las antenas de la superficie terrestre (entre 7 y 3 mm). No obstante, HALCA ha permitido constatar la viabilidad de la idea y de futuras misiones de VLBI con antenas en órbita, como su sucesora, VSOP-2, aún en proyecto, o la misión RadioAstron (de la agencia espacial rusa), con las que se pretende alcanzar resoluciones angulares del orden de 10 microsegundos de arco.

De igual manera se están realizando esfuerzos para mejorar la resolución angular gracias a una disminución de la longitud de onda de observación. Supone un imponente desafío desde el punto de vista técnico, aunque ya se ha avanzado cierto trecho en esa dirección, con observaciones de VLBI a longitudes de onda de 1 mm.

A más largo plazo podría llevarse la técnica de la interferometría hasta el rango energético de los rayos X. El proyecto MAXIM, de la NASA, se propone colocar en órbita un conjunto de 32 telescopios de rayos X con una separación máxima entre sí de 200 m, lo que

Bibliografía complementaria

FLASHING SUPERLUMINAL COMPONENTS IN THE JET OF THE RADIO GALAXY 3C120. J. L. Gómez, A. P. Marscher, A. Alberdi, S. G. Jorstad, C. García-Miró en *Science*, vol. 289, pág. 2317; 2000.

OBSERVATIONAL EVIDENCE FOR THE ACCRETION-DISK ORIGIN FOR A RADIO JET IN AN ACTIVE GALAXY. A. P. Marscher, S. G. Jorstad, J. L. Gómez, M. F. Aller, H. Teräsranta, M. L. Lister, A. M. Stirling en *Nature*, vol. 417, pág. 625; 2002.

<http://www.nrao.edu>