

# AGUJEROS NEGROS SUPERMASIVOS Y EL CENTRO GALÁCTICO

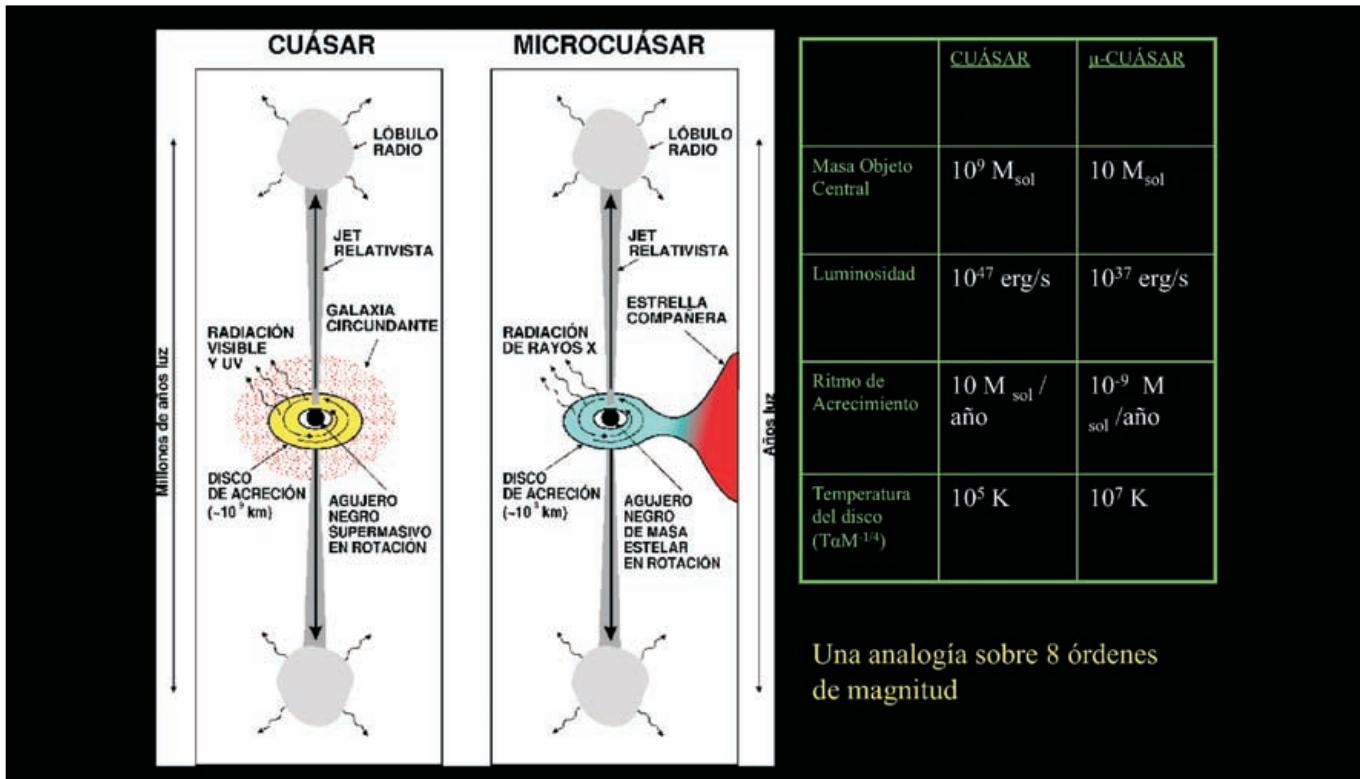
JUAN MARÍA MARCAIDE OSORO \*

\* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Valverde 22, 28004 Madrid.

## ¿EXISTEN LOS AGUJEROS NEGROS?

Los agujeros negros pertenecen ya al lenguaje coloquial, a menudo para indicar algo que se lo puede tragar todo o algo a lo que nada ni nadie se debe acercar sin tener graves consecuencias. Para la mayoría de la gente el agujero negro tiene un significado misterioso e incluso su existencia queda en el ámbito de la creencia o misterio. Sin embargo, los agujeros negros existen y son simplemente cuerpos celestes que superan una cierta masa dentro de un determinado volumen. Como otros cuerpos celestes pueden estar en mayor o menor rotación y estar ligados gravitatoriamente a otros cuerpos celestes. Cuando la masa del agujero negro es comparable a las estrellas y se encuentra fuertemente ligado gravitatoriamente a una estrella se trata de un agujero negro estelar. De hecho, la manera más rigurosa de determinar la masa de un agujero negro estelar es aplicando las leyes de Kepler a un sistema estelar binario en el que una de las dos estrellas es una estrella más o menos normal. De este modo, estudiando espectroscópicamente los movimientos radiales de estas estrellas normales se ha podido determinar en una veintena de casos que hay agujeros negros que son parte de un sistema binario ya que la función de masa de la estrella (invisible) compañera es mayor que 5 masas solares. Es decir, se conocen una veintena de agujeros negros estelares a través del estudio de estrellas binarias. Los agujeros negros no se pueden ver directamente, pero se puede determinar su masa del mismo modo que se puede determinar la masa de una estrella de neutrones, de una estrella enana blanca, de una estrella normal o de una estrella gigante. Basta que el agujero negro se encuentre en el sistema binario apropiado para permitir ciertas mediciones.

Aproximadamente la mitad de las estrellas nacen en sistemas binarios y evolucionan en interacción con su pareja. Si la separación de las estrellas en el sistema binario no es muy grande las estrellas pueden transferirse (es decir, robarse una a otra) masa durante su evolución. Las posibilidades son variadas y frecuentemente lo que resulta es que la estrella más compacta recibe masa de la parte más externa de una estrella más pesada pero más grande, de una gigante roja. En muchos casos la estrella más compacta será una enana blanca (un gas degenerado de electrones), en menos casos la estrella compacta será una estrella de neutrones (un gas degenerado de neutrones) y en algunos casos esa estrella compacta será un agujero negro. Una estrella de más de 25 masas solares en su edad temprana (lo que se conoce como secuencia principal) puede terminar como agujero negro a través de un colapso gravitatorio de su parte central tras haber consumido todo su combustible nuclear. La implosión de la parte central de la estrella masiva, una vez que en ella la síntesis de elementos llega hasta el hierro (tras combustión sucesiva del hidrógeno, helio, carbono, oxígeno, elementos ligeros y medios), va asociada a una explosión supernova en la que toda la estrella masiva (salvo el núcleo que colapsa hacia una estrella de neutrones o un agujero negro) queda destrozada por una onda de choque que se forma durante la implosión estelar y que barre la estrella desde la parte externa de su núcleo. Si la explosión supernova tiene lugar en una estrella binaria existe la posibilidad de que la ligadura se rompa y la estrella compañera quede desligada del resto compacto de la supernova, en cuyo caso el resto compacto vagaría por el espacio sin emitir luz y sin que pudiéramos detectarlo. Pero, si la explosión sucede de tal modo que la ligadura se mantenga tendrímos al agujero negro en órbita alrededor de la



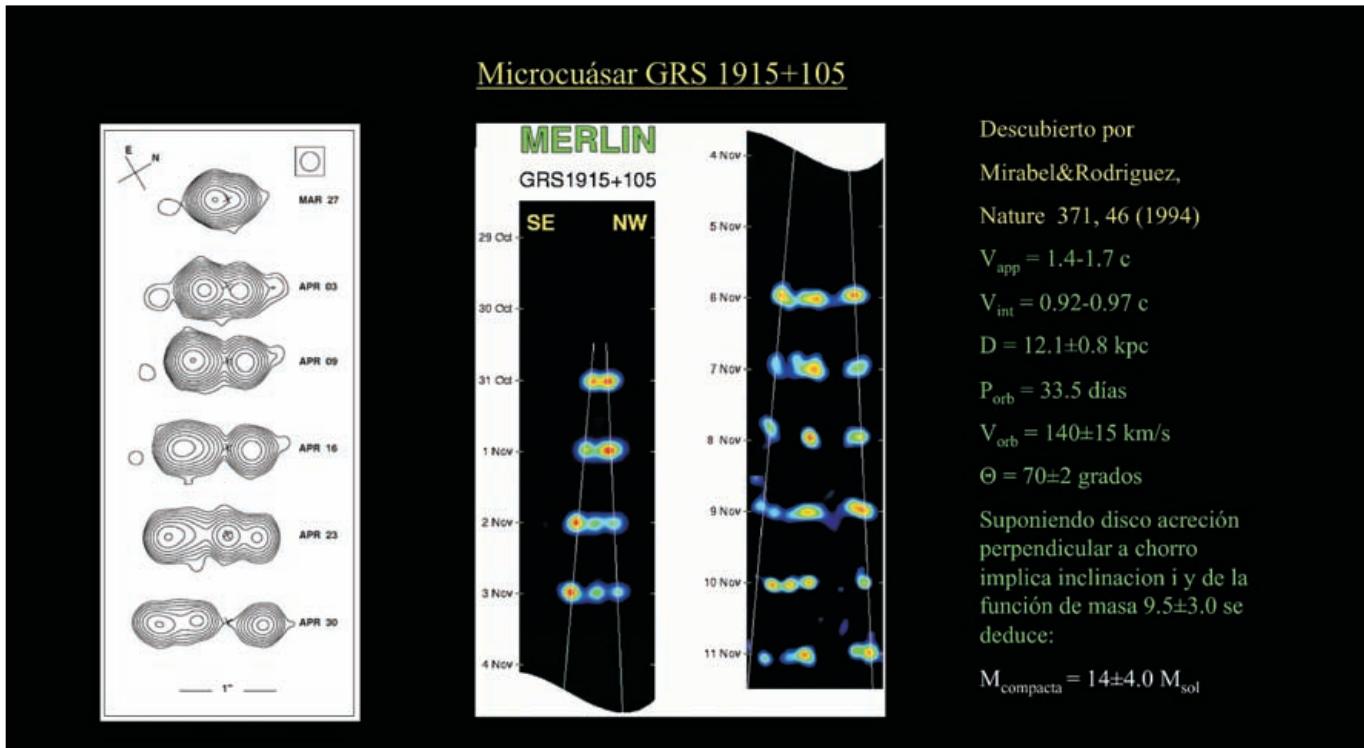
**Figura 1.** Modelos de cuásar y micro-cuásar comparados.

estrella compañera (o viceversa). En este caso, la masa del agujero negro se podrá determinar como se puede determinar la masa de cualquier compañera de una estrella si las condiciones de observación (sobre todo espectroscópicas) son favorables. En casi una veintena de casos ha sido posible.

En muchos de estos casos se observa un comportamiento de tipo micro-cuásar, cualitativamente similar al comportamiento de tipo cuásar, conocido con anterioridad a escala extragaláctica y con magnitudes escaladas por unos 8 órdenes de magnitud. La **Figura 1** esquematiza ese comportamiento para los cuásares y los micro-cuásares. En los micro-cuásares, el esquema muestra el agujero negro central rodeado de un disco de acreción (o acrecimiento, quizás más correcto en español) que se alimenta del material que roba a su estrella compañera gigante roja. Dos chorros de material relativista salen del entorno del agujero negro tras la transformación de energía del material que cae de la parte interior del disco de acreción por la acción de los campos magnéticos anclados a ese disco en rotación. El material de estos chorros relativistas eventualmente interactúa con el

medio interestelar y se frena. En este frenado se producen frentes de choque, turbulencias y amplificaciones de los campos magnéticos que dan lugar a radiación sincrotrón en unos lóbulos de radio. Entre el agujero negro y esos lóbulos se pueden ver componentes de emisión sincrotrón que viajan a velocidades relativistas y que corresponden a emisión del material del chorro causada por ondas de choque viajeras. Estos movimientos relativistas se pueden ver como componentes superluminales, viajando a velocidades aparentes superiores a la de la luz, debido a la geometría de la fuente, los chorros y el observador. Véase la **Figura 2** para el primero de los micro-cuásares descubiertos. En este momento se conocen más de una docena de micro-cuásares.

Una predicción del modelo es que la temperatura de la parte interior del disco de acreción de los micro-cuásares es de unos diez millones de grados y que se debería observar la línea de emisión del hierro ionizado de 6.4 KeV con una forma característica del perfil correspondiente a la rotación del disco. En efecto, este perfil se observa en muchos casos, como el mostrado en la **Figura 3**.



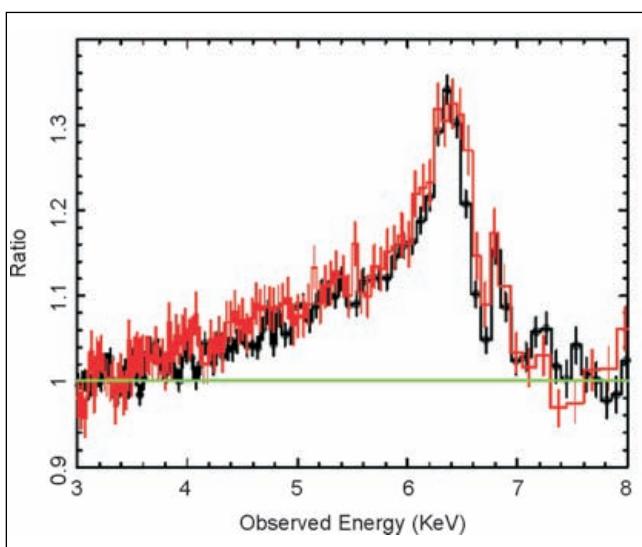
**Figura 2.** Primer micro-cuásar descubierto. Las dos tiras (en contornos, a la izquierda, corresponde al descubrimiento del microcuásar, y en color en el centro en imágenes de mayor resolución y mejor muestreo temporal) muestran como se separan las componentes eyectadas desde el entorno del agujero negro a lo largo de los chorros. El movimiento es relativista y por efectos de proyección se ve como superluminal, es decir, de velocidad superior a la velocidad de la luz.

Por tanto, se han detectado agujeros negros en estrellas binarias. Seguramente existe una población más numerosa de agujeros negros estelares que vagan

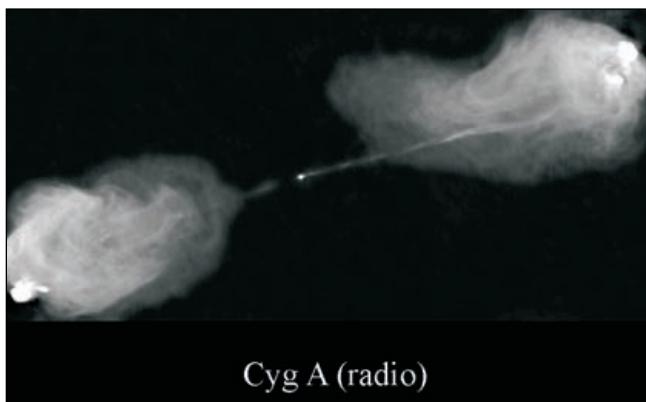
por el espacio interestelar y que no se detectan pues ellos mismos no emiten radiación y tampoco su entorno lo hace pues no reciben energía de un disco de acreción que a su vez la recibe del entorno. Pero no son sólo estos los agujeros negros que los astrónomos encuentran en el universo. También encuentran agujeros negros supermasivos. La evidencia indirecta inicial procedió de una fenomenología que es común a los cuásares pero que se da en otros objetos similares como radio galaxias. La evidencia reciente es más directa. Veámoslo.

## AGUJEROS NEGROS SUPERMASIVOS

La **Figura 4** muestra una imagen radio de la radio-galaxia Cygnus A. Es una imagen obtenida en los primeros años ochenta del siglo pasado cuando las primeras supercomputadoras estuvieron disponibles y cuando el Very Large Array (VLA) pudo muestrear la fuente a varias escalas angulares. Años antes se había observado que los lóbulos de emisión radio estaban simétricamente situados con respecto a una galaxia



**Figura 3.** Forma de la línea de Hierro de 6.4 KeV emitida por el disco de acrecimiento en rotación alrededor de un agujero negro.

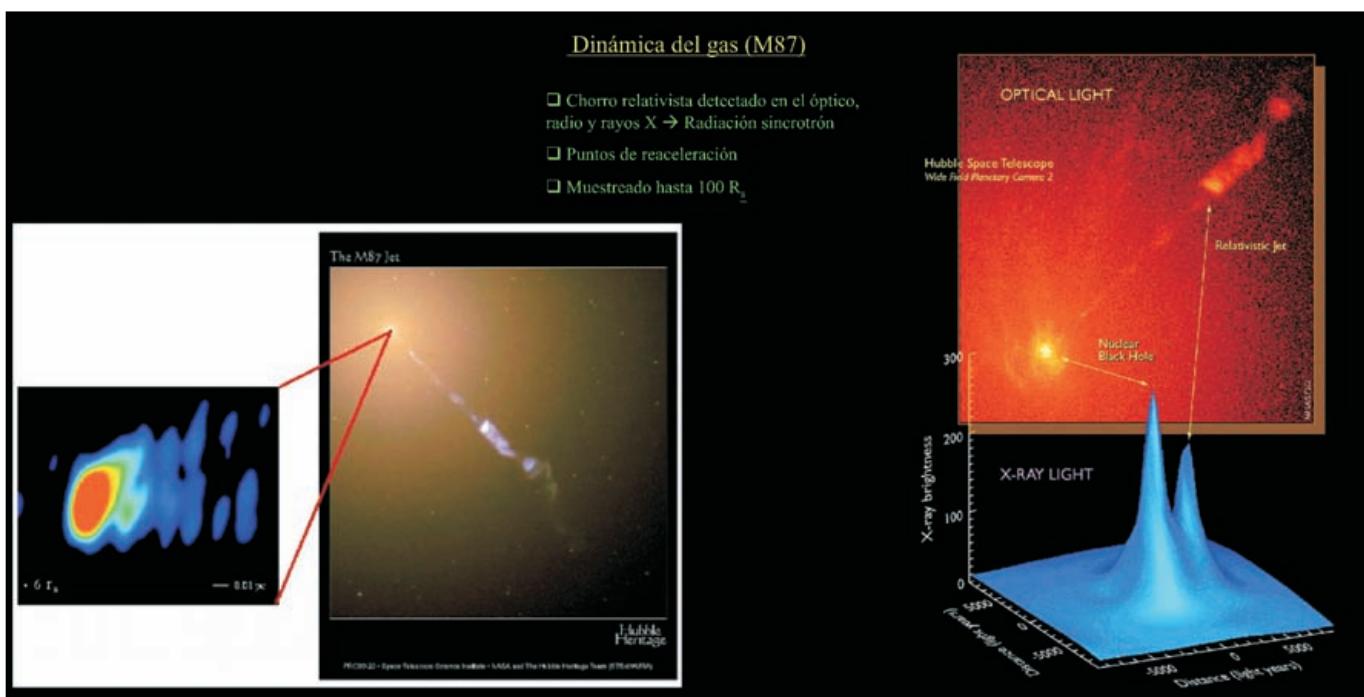


**Figura 4.** Imagen de la radio galaxia Cygnus A obtenida con el VLA que muestra los chorros estrechos por los que se alimentan los lóbulos de emisión radio a distancias de cientos de miles de años-luz del agujero negro que reside en el centro de la galaxia gigante que se ve en la imagen como un punto brillante central.

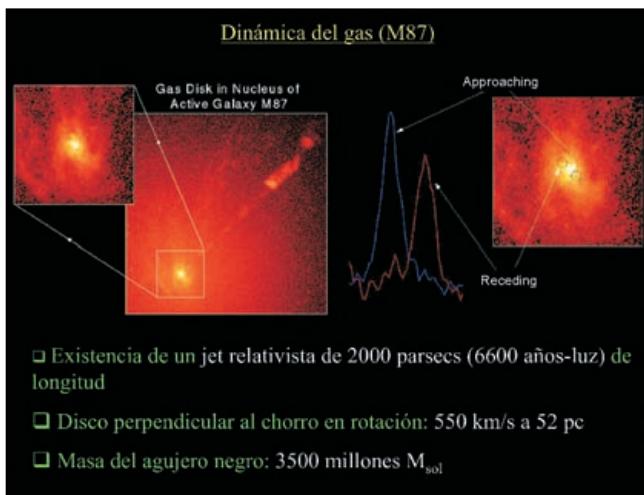
gigante en el centro y se había sugerido que la energía para alimentar la radiación de esos lóbulos provenía de un agujero negro supermasivo en el centro de esa galaxia y que esa energía en forma de plasma relativista se transportaba a distancias inmensas a través de chorros muy estrechos y con pocas pérdidas radiativas. Durante mucho tiempo no hubo evidencia observa-

cional de esos largos y delgados chorros. La imagen de la **Figura 4** los muestra nítidamente. Luego se han estudiado casos similares, pero en los que el transporte del material relativista no es tan eficiente ni colimado, sino que sufre pérdidas radiativas que permiten ver los chorros prácticamente desde la base de los chorros cercana a la galaxia. Como se puede ver en la **Figura 4** los chorros son bien derechos y de una extensión de cientos de miles de parsecs que indica que hay algo físico que conserva la memoria durante todo ese tiempo, quizás algún objeto muy pesado en rotación cuyo eje se mantiene invariable durante todo ese tiempo.

Hay otro caso históricamente relevante: el chorro visible en la galaxia elíptica M87, en el centro del cúmulo de Virgo a una distancia de 60 millones de años-luz. En la **Figura 5** se muestra el chorro, tanto en su versión visible, descubierta a principios del siglo XX, como en la versión radio y rayos-X. La semejanza de las imágenes visible y radio es notable. En el centro de M87 se encuentra en plena actividad un agujero negro con una masa de mil millones de masas solares. Emite continuamente material reprocesado de su entorno, a lo largo de grandes y estrechos chorros, a



**Figura 5.** Imágenes del chorro que surge del centro de la galaxia elíptica gigante M87. A la izquierda, imágenes radio del chorro y de la parte más interior del chorro. A la derecha arriba, imagen en el visible, y a la derecha abajo, una representación de la emisión en rayos-X.



**Figura 6.** Imágenes de la parte central de la base del chorro de M87. A la derecha se muestran los perfiles de las líneas de emisión correspondientes a dos posiciones centradas sobre el disco de acreción a ambos lados de la dirección central en la que se encuentra el agujero negro supermasivo. Una línea aparece corrida al azul (material acercándose) y al rojo (material alejándose) con respecto al material en la dirección al agujero negro.

casi la velocidad de la luz. También se muestra en la figura un recuadro con una imagen de la componente compacta en radio, componente espacialmente muy cercana al agujero negro supermasivo. La estructura que se muestra en el recuadro, obtenida a la longitud de onda de 7 milímetros y con observaciones de interferometría intercontinental, cambia en cuestión de días, indicando un movimiento ultra-relativista.

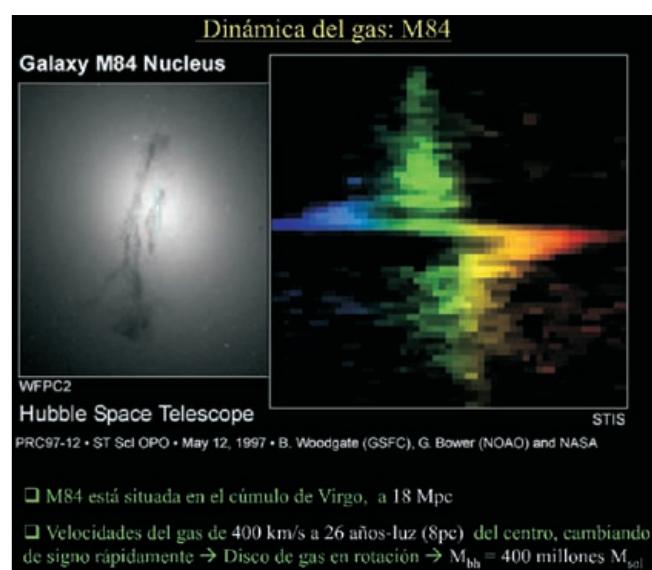
La dinámica del gas alrededor del núcleo de M87 permite estimar la masa del agujero negro. Se puede ver que, a cada lado del núcleo, el gas se mueve a distinta velocidad, en exceso o defecto de la velocidad del gas en el centro, indicando una rotación del gas. Teniendo en cuenta la distancia a M87, la distancia angular entre las áreas de integración utilizadas en la imagen y la diferencia de las velocidades obtenidas, la ley de Kepler nos permite estimar la masa, que resulta ser de unos 3500 millones de masas solares. O sea, la masa del agujero negro en el núcleo de M87 es aproximadamente ocho órdenes de magnitud mayor que la masa de una estrella negra. Ver **Figura 6**.

La **Figura 7** muestra un caso similar en la galaxia M84. Esta galaxia elíptica, más pequeña que M87, también tiene en su centro un agujero negro cuya masa se puede determinar de modo parecido, dando como

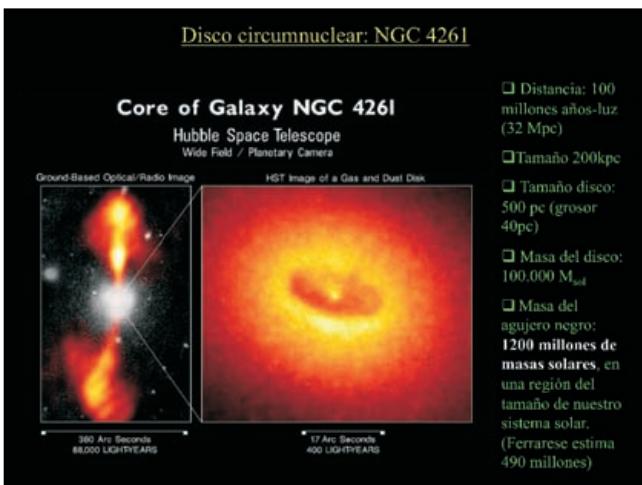
resultado 400 millones de masas solares, un orden de magnitud (factor 10) menor que la masa del agujero negro en M87.

Otro ejemplo interesante y no muy distinto es el de la galaxia NGC 4261 mostrado en la **Figura 8**. A la izquierda de la figura se muestra la imagen de emisión radio en dirección norte-sur y en su centro, en blanco, la emisión óptica de la galaxia de la que proceden los chorros. A la derecha se muestra la imagen de alta resolución del centro de esa galaxia, donde se puede ver un disco circunnuclear y en su centro el entorno del agujero negro, del que sale hacia arriba en forma de cono la emisión visible. La medida de las velocidades del gas en ese disco permite estimar en 1200 millones de masas solares la masa del agujero negro supermasivo utilizando otra vez de modo simple la ley de Kepler.

Hay un caso muy especial en el que se han podido realizar mediciones de alta precisión. Se trata de la galaxia NGC 4258 en la que, en su parte central, se ve prácticamente de perfil el disco de acrecimiento y sobre él, en su parte más interna de extensión aproximada de un año-luz, se detectan máseres de agua en rotación. Véase la **Figura 9**. Además de la emisión de continuo relacionada con el chorro, perpendicular al



**Figura 7.** A la izquierda, imagen infrarroja de la parte central de la galaxia M84 y a la derecha campo de velocidades obtenido sobre la rendija indicada en la figura de la izquierda. El campo de velocidades muestra claramente en su zona central la rotación del disco de acreción alrededor del agujero negro.

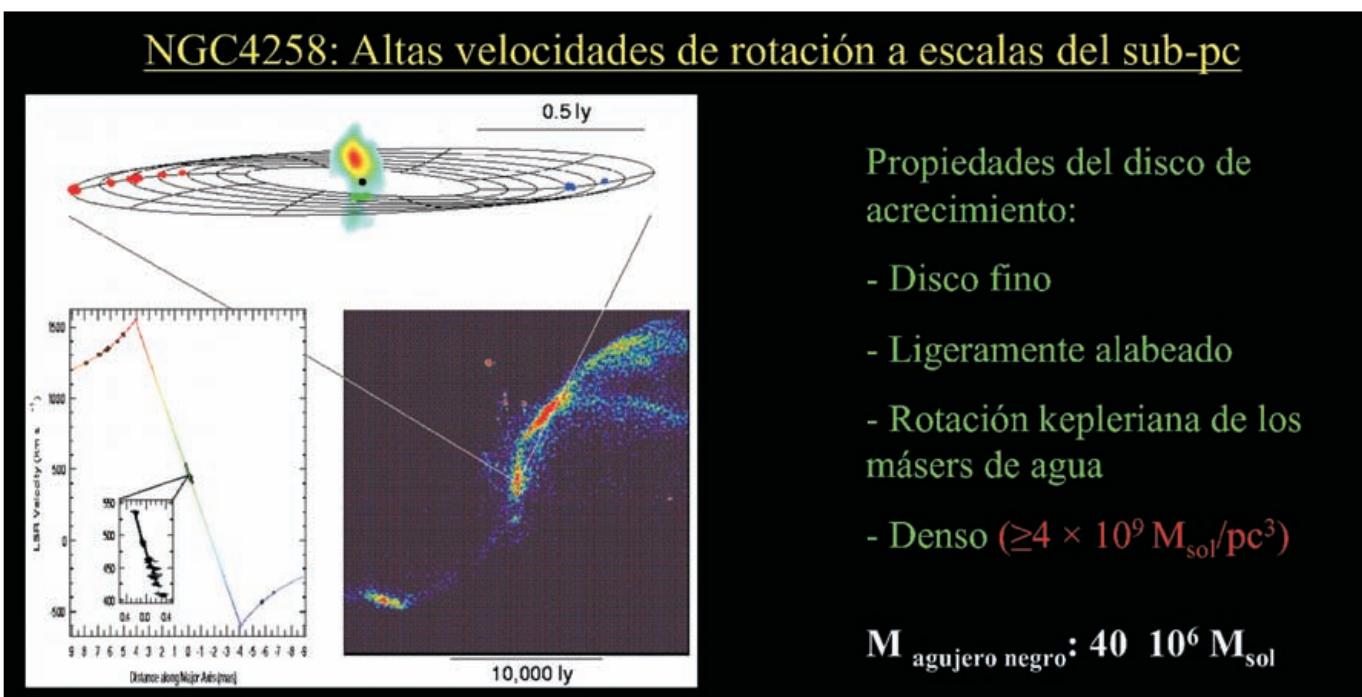


**Figura 8.** A la izquierda en recuadro una imagen radio y superpuesta en su centro, en blanco, la imagen de la galaxia NGC 4261 en el visible a baja resolución. En el cuadro de la derecha una imagen de alta resolución del centro de la galaxia, mostrando un disco circumnuclear (más oscuro) y dentro de él un cono de luz que sale hacia arriba del entorno del agujero negro supermasivo.

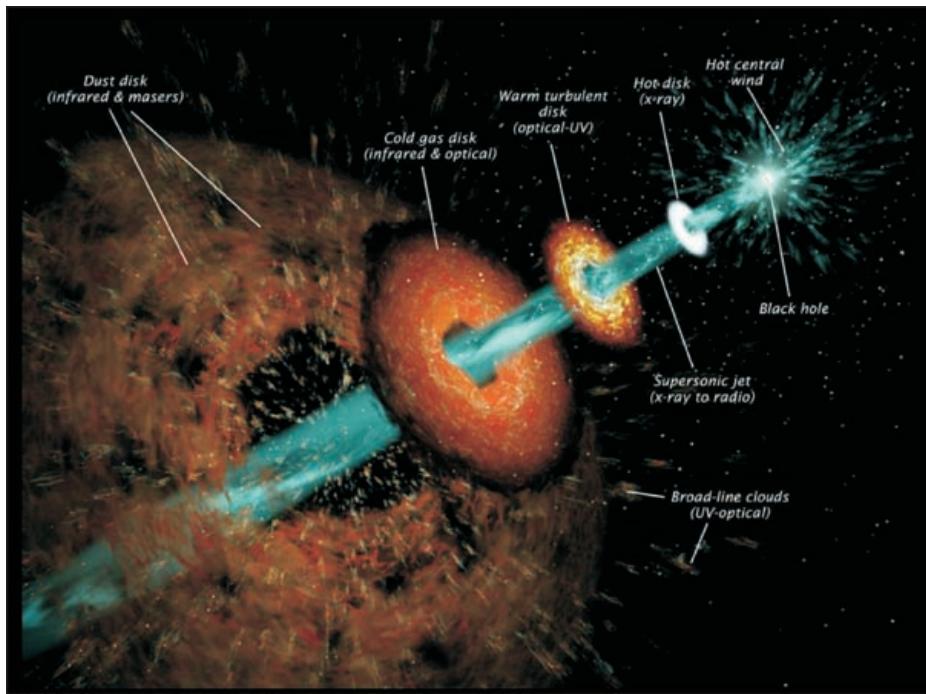
plano del disco, se detectan 3 sistemas de máseres: uno en la dirección al centro con velocidad tangencial debida a la rotación y por tanto correspondiente a la velocidad de reposo de la galaxia, y un sistema a cada

lado del sistema central, con velocidades inferior (rojo) y superior (azul) al central, indicación clara de una rotación. La medida precisa del movimiento de estos máseres por medio de técnicas de interferometría intercontinental, como se muestra en el recuadro inferior izquierdo de la figura, permite una estimación precisa de la masa utilizando la ley de Kepler. Esta determinación cinemática directa indica que la masa encerrada en menos de un año-luz de distancia es de 40 millones de masas solares. La determinación de una masa tan grande tiene lugar sobre un volumen pequeño. Sólo un agujero negro puede tener una densidad de ese tipo.

Los casos anteriores son unos casos representativos de las determinaciones actuales de las masas de los agujeros negros supermasivos en los centros de las galaxias, principalmente de las galaxias elípticas. Un listado completo de los agujeros negros supermasivos cuya masa se ha determinado se puede encontrar en la dirección web siguiente: <http://blackholes.stardate.org/directory/>. El modelo conceptual de cómo puede ser la estructura de la parte central de una galaxia activa alrededor de un agujero negro supermasivo se muestra en la **Figura 10**, en la que cada componente se ha



**Figura 9.** Determinación de la masa del agujero negro en el centro de la galaxia NGC 4258 por medio de la ley de Kepler utilizando la determinación de los movimientos de los máseres de agua que se encuentran en el disco de acrecimiento, y rotando con él, a una distancia de aproximadamente medio año-luz del agujero negro.



**Figura 10.** Disección artística de un agujero negro supermasivo y del disco de acreción que le rodea en partes de distinto contenido y temperatura.

### Propiedades de los Agujeros Negros

□ El origen de la luminosidad resulta de la captura de materia: una fracción de la energía cinética liberada por unidad de tiempo por la materia capturada se transformaría en luminosidad:

$$L \sim \frac{1}{2} dM/dt V^2 = (GM dM/dt)/R, \text{ donde}$$

R: Radio del Objeto Compacto

dM/dt: Ritmo de acrecimiento de materia

V: Velocidad de caída libre de materia  $V^2=2GM/R$

□ Radio de Schwarzschild:  $R_{sch} = 2GM/c^2$

Define el horizonte de sucesos, la “máxima compactación”, donde la velocidad de escape iguala la velocidad de la luz.

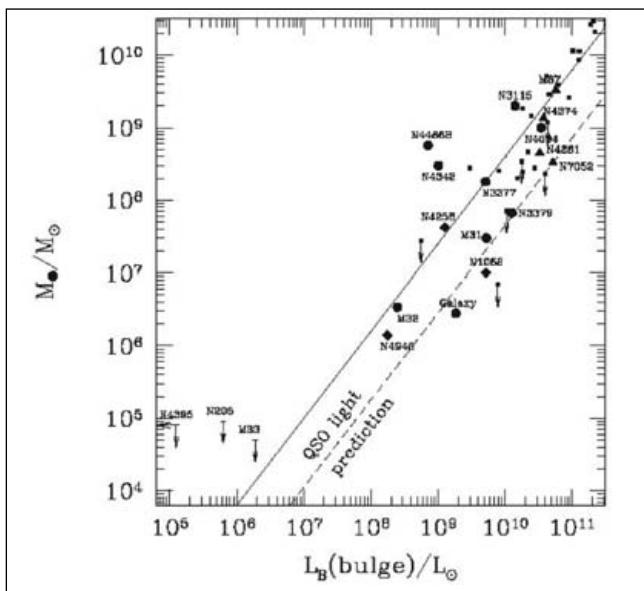
□ La incorporación de materia se realiza a través de un disco de acrecimiento, perpendicularmente al cual se eyectan los chorros de plasma relativista. La temperatura de la última órbita estable alrededor de un agujero negro orbitando al límite de Eddington,

$$T \sim 2 \times 10^7 M^{-1/4} \text{ con } T \text{ (K)} \text{ y } M \text{ en masas solares.}$$

**Figura 11.** Propiedades principales de los agujeros negros.

desplazado sobre el eje de simetría (como se muestran frecuentemente las distintas piezas mecánicas del eje del motor de un coche), a lo largo del cual sale un chorro estrecho (en azul verdoso en la figura). La figura muestra así en su parte más derecha la región

central asociada al agujero negro supermasivo. Un poco más a la izquierda el disco de acrecimiento que rota alrededor del agujero negro, con una temperatura de unos cien mil grados centígrados y emite rayos-X (la temperatura varía con el inverso de la raíz cuarta de



**Figura 12.** Correlación entre las masas de los agujeros negros en el centro de las galaxias y la luminosidad (relacionada con la masa) del bulbo esférico de esas galaxias.

la masa de agujero negro, por tanto es más baja cuanto más pesado es el agujero negro; de hecho los discos de acrecimiento de los agujeros negros estelares tienen temperaturas cien veces más altas que los discos de acrecimiento de los agujeros negros supermasivos). Rodeando a este disco hay otros discos con temperaturas progresivamente más bajas cuanto más externos son. El más interior da lugar a emisión en el ultravioleta y visible y el siguiente hacia fuera a emisión en el visible e infrarrojo. En la parte más externa hay un disco de baja temperatura y de mucho contenido de polvo que da lugar a emisión en el infrarrojo.

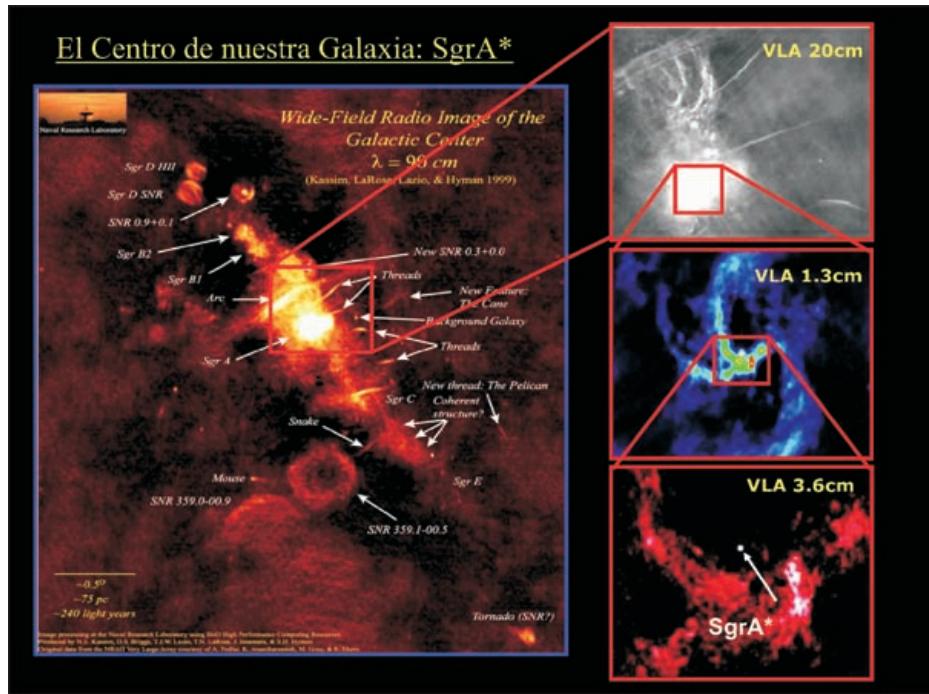
La **Figura 11** muestra de modo sucinto tres de las principales propiedades de los agujeros negros: la luminosidad asociada proviene de la transformación de una parte de la energía cinética liberada por la materia capturada por el agujero negro; la expresión del radio de Schwarzschild, que corresponde al tamaño de máxima compactación de un agujero negro para un observador externo, ya que para ese radio la velocidad de escape es igual a la velocidad de la luz y por tanto nada, ni incluso la luz, puede escapar de ese entorno del agujero negro; y la temperatura del disco de acrecimiento en función de la masa del agujero negro.

Finalmente, y antes de ocuparnos del agujero negro supermasivo más cercano a nosotros, el que se encuen-

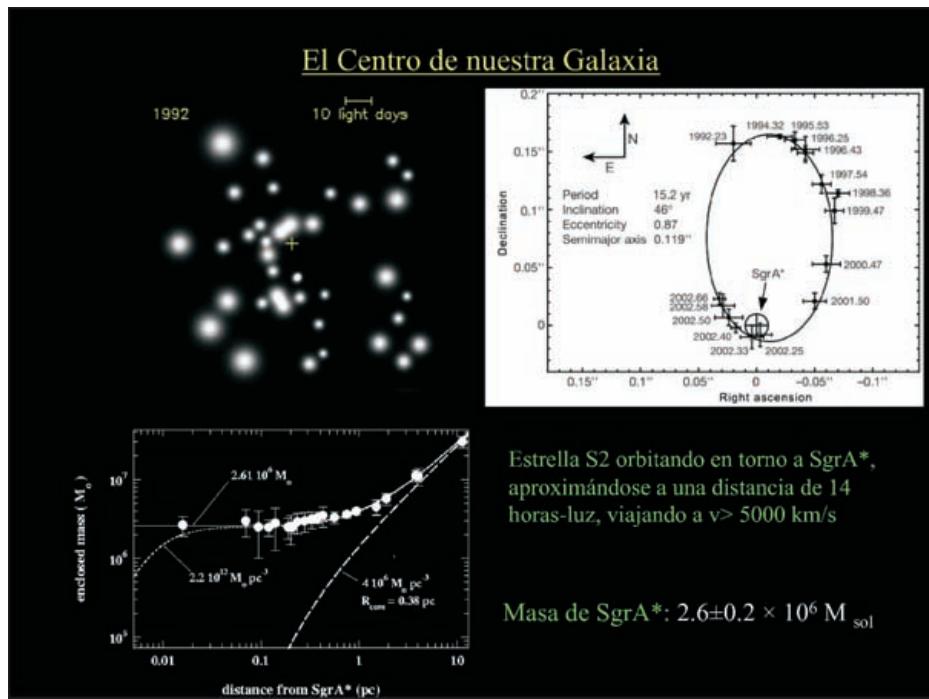
tra en el centro de nuestra galaxia, se muestra en la **Figura 12** una correlación que se ha encontrado entre las masas de los agujeros negros supermasivos y la luminosidad (o masa) del bulbo de las galaxias en cuyo centro residen los agujeros negros. La correlación es extraordinaria. Su significado no está todavía del todo comprendido, pues bien podría ser que se formaran los agujeros negros supermasivos con masa proporcional a la masa del bulbo de las galaxias o bien, que de algún modo se formen primero los agujeros negros supermasivos como colapso del gas acumulado en el pozo de potencial y luego ellos influencien cuanta masa puede tener el bulbo de la galaxia. Es notable esta correlación que se produce sobre varios órdenes de magnitud de las masas.

## EL AGUJERO NEGRO MASIVO EN EL CENTRO DE LA VÍA LACTEA

El centro de nuestra galaxia está en la dirección de la constelación Sagitario a unos 25 mil años-luz. La cantidad de estrellas que uno debería ver en esa dirección debería ser mucho más grande que en cualquier otra, sin embargo la mayoría de ellas quedan ocultas por la absorción del polvo en plano de la galaxia. Afortunadamente el polvo presenta poca absorción a las longitudes de onda más largas del infrarrojo y radio y la zona del centro de la galaxia se puede estudiar en esos rangos espectrales. La **Figura 13** muestra la emisión de radio en longitudes de onda centimétricas hacia el centro de la galaxia. La imagen de la izquierda muestra la emisión radio del plano de la galaxia en la dirección de Sagitario, con sus dos componentes principales, Sgr A y B. La imagen superior de la derecha muestra la componente A con poca resolución angular y la del centro muestra la estructura tan peculiar que tiene esa componente cuando se observa con 1" de resolución. Justamente en la parte norte cercana al centro de esa imagen, como se ve en la imagen inferior derecha, se encuentra un objeto de emisión radio muy compacta, Sgr A\*, que los astrónomos han considerado durante años y años asociado al centro de la galaxia y a un posible agujero negro masivo. Se ha determinado el tamaño de este objeto compacto a varias longitudes de onda centimétricas utilizando la técnica de interferometría de muy larga base y se ha determinado que su tamaño varía con la longitud de onda de observación al



**Figura 13.** Imágenes de radio del entorno de Sgr A\*, radiofuentes compactas asociadas al agujero negro masivo en el centro de la Vía Láctea. A la izquierda, imagen del campo donde se aprecia el plano galáctico. A la derecha abajo, situación de Sgr A\* con respecto al centro de la radio estructura de tres brazos en el centro de la galaxia.



**Figura 14.** Determinación de la masa del agujero negro en el centro de la Vía Láctea. Arriba a la izquierda, el campo estelar infrarrojo alrededor de Sgr A\*. Arriba a la derecha, determinación de la órbita de la estrella infrarroja S2 alrededor de Sgr A\*. Abajo, determinación de la masa del agujero negro a parte de los movimientos de las estrellas infrarrojas y la ley de Kepler.

cuadrado, lo que indica que el tamaño observado se debe a la dispersión por electrones de la nube que rodea a la componente compacta y no a la propia componente. Sin embargo, recientes observaciones a la longitud de onda de 3mm han mostrado que esa relación ya no se mantiene. Otras observaciones todavía más recientes a longitud de onda de 1mm con interferometría continental han resuelto la estructura del objeto, que no es mucho mayor que el tamaño de nuestro sistema solar, pero todavía no han podido determinar su forma. Según se hagan ciertos desarrollos tecnológicos y se equipen nuevos instrumentos como ALMA para interferometría intercontinental se podrá en unos pocos años determinar la forma intrínseca de un agujero negro cuando se consigan las primeras imágenes de Sgr A\*.

Por otro lado, observaciones realizadas en el infrarrojo durante varios años de las estrellas en la vecindad de Sgr A\* han permitido determinar las órbitas de esas estrellas, y en especial la de la que está mas cerca de Sgr A\* (S2), que tiene un periodo orbital de solo 15 años. Véase la **Figura 14**: a la izquierda el campo estelar infrarrojo alrededor de SgrA\*, a la derecha la órbita de la estrella S2 y abajo la determinación de la masa del agujero negro supermasivo en base a los movimientos de esas estrellas. Una primera determinación de la masa (a la que corresponde la figura) la estimó en 2.6 millones de masas solares. Sin embargo, otra determinación más reciente que ha tenido en cuenta aspectos no considerados en el (difícil) análisis inicial cifra esta masa en 4 millones de masas solares. O sea, se trata de un agujero negro supermasivo pero no tan “súper” sino intermedio. De hecho, de no ser porque se encuentra muy cerca de nosotros en nuestra misma galaxia este agujero negro supermasivo no hubiera sido detectado. Además, se trata de un agujero

negro con muy poca actividad en la actualidad. No se conoce que tenga ningún chorro asociado.

## CONCLUSIONES

Los agujeros negros supermasivos existen. Prácticamente cada galaxia tiene en su centro un agujero negro supermasivo y la masa del agujero negro está correlacionada con la masa (y la luminosidad) del bulbo de la galaxia. Las masas de los agujeros negros supermasivos van desde un millón de masas solares, como el del centro de la Vía Láctea, hasta miles de millones de masas solares en las galaxias gigantes. Un agujero negro supermasivo en una galaxia activa de tamaño medio tiene una masa de cientos de millones de veces la masa característica de los agujeros negros estelares, de ahí la calificación de supermasivos.

Como en sus parientes estelares, los agujeros negros se dejan sentir en general, además de por la rotación del gas que lo rodea, por la emisión de un chorro de material relativista a lo largo del eje de rotación y por la emisión de rayos X del disco de acreción (acrecimiento) del que el entorno inmediato del agujero negro recibe el material que procesa (de un modo complicado y todavía no bien entendido) en el material de ese chorro relativista, que es muy evidente en los radio cuásares y las radio galaxias.

Las cuestiones de cómo y cuando se forman los agujeros negros supermasivos quedan para otra ocasión. También otras cuestiones como la influencia de los agujeros negros masivos en la formación de galaxias y en la evolución del universo. Son cuestiones de candente actualidad a las que los astrónomos no han dado todavía respuestas definitivas.