

Agujeros negros astrofísicos

1. Agujeros negros

Por definición, un *agujero negro* es una región del espacio de la que nada puede escapar, debido a la intensidad del campo gravitatorio producido por la masa contenida en ella. ¿Cómo puede esto ocurrir? Para que un cuerpo escape de la superficie de una región de radio R que contiene una masa M , debe imprimirse al mismo una velocidad inicial superior a un dado valor crítico, llamado *velocidad de escape*. La velocidad de escape corresponde a la mínima energía cinética que debe tener el cuerpo para compensar la energía del campo gravitatorio de la masa M , y así permitir que el mismo se aleje indefinidamente de ella. Así, la velocidad de escape queda determinada por el cociente M/R , que determina la energía del campo gravitatorio en la superficie, y que a la vez indica cuán compacto es el objeto. La velocidad de escape aumenta al crecer este cociente. Una región u objeto suficientemente compacto puede entonces tener una velocidad de escape tan alta como la de la luz. En este caso, la luz no puede escapar de dicha región, y por consiguiente tampoco puede hacerlo ninguna otra señal u objeto que viaje a menor velocidad que ella. Estamos en presencia de un agujero negro, del interior de cuya frontera (llamada *horizonte de eventos*) es imposible salir.

El valor crítico de la compacidad es $M/R \approx 0,34 M_{\odot}/\text{km}$. ¡Sería necesario comprimir la tercera parte de la masa del Sol a un tamaño de un kilómetro para formar un agujero negro! Podemos plantear este hecho de una manera diferente, considerando que el Sol tiene un radio $R_{\odot} \approx 696.000 \text{ km}$: la compacidad de un agujero negro es entonces $M/R \approx 236.000 M_{\odot}/R_{\odot}$. En otras palabras, los agujeros negros son 236.000 veces más compactos que el Sol, y aún unas dos veces más compactos que las estrellas de neutrones típicas, los objetos estelares más densos conocidos. Dadas estas características extremas, es válido preguntarse cuáles serán las propiedades observables de estos objetos. De ellas depende el lugar y la forma en que esperamos encontrarlos.

De acuerdo a la Teoría General de la Relatividad, los agujeros negros pueden describirse de manera muy sencilla, a través de solamente tres parámetros físicos: su masa, su momento angular (que indica su estado de rotación), y su carga eléctrica. Claramente la masa es el parámetro principal, ya que ella produce el campo gravitatorio responsable de la existencia misma de los agujeros negros. La masa de un agujero negro puede en principio tomar cualquier valor, aunque un límite inferior para la misma viene dado por la escala de Planck, en la que los efectos cuánticos de la gravedad se hacen perceptibles. Dicha masa corresponde a apenas unas decenas de microgramos, por lo que los agujeros negros con masas de este orden se denominan *microagujeros negros*. Éstos constituyen una predicción interesante de las modernas teorías sobre la gravitación, sin embargo, no trataremos sobre ellos en este artículo, ya que estamos interesados en agujeros negros detectables en el dominio de la Astrofísica.

En el área de la Astrofísica esperamos, en cambio, encontrar agujeros negros de masas comparables a las de los planetas, las estrellas, o las galaxias. Dos clases de agujeros negros astrofísicos han sido predichos: los *agujeros negros de masa estelar*, y los *agujeros negros supermasivos*. En ambos casos, existen observaciones que proveen evidencia de su existencia. Como su nombre lo indica, los primeros tienen masas comparables a las de las estrellas y se forman en ciertas etapas de la

evolución de las mismas. Los últimos, por su parte, se observan en el centro de las galaxias, y sus masas son millones de veces mayores a las estelares. Existe actualmente un debate en la comunidad astrofísica, acerca de la existencia de una tercera clase de agujeros negros: los *agujeros negros de masa intermedia*. Éstos tendrían masas de cientos a miles de veces mayores a la del Sol, y su existencia podría resolver algunos misterios sin develar. Este artículo pretende dar una introducción general a los agujeros negros astrofísicos, haciendo énfasis en las características y procesos que permiten su detección.

2. Agujeros negros de masa estelar

Las teorías que pretenden explicar el origen y la evolución de las estrellas sugieren que los agujeros negros de masa estelar podrían formarse a partir de las estrellas masivas (aquellas que tienen una masa de al menos ocho veces la solar). Estas estrellas agotan rápidamente el combustible nuclear a partir del cual generan la energía con la que brillan, dejando en su interior un núcleo extremadamente compacto. Si este núcleo alcanza una masa mayor a cierto límite, que se encuentra aproximadamente entre dos y tres veces la masa solar, colapsa hasta alcanzar la compacidad necesaria para transformarse en un agujero negro; en caso contrario se produce una estrella de neutrones (para una descripción de estas últimas sugerimos leer el artículo de Federico García² en el Boletín Radio@astronómico número 37). La pérdida de la fuente de energía provoca la expulsión de la envoltura estelar en una explosión (llamada *supernova*), dejando expuesto el núcleo como remanente compacto: un agujero negro o una estrella de neutrones.

Las condiciones bajo las cuales el núcleo estelar se transforma efectivamente en un agujero negro (en lugar de una estrella de neutrones) son aún tema de investigación. Muy probablemente la formación de un agujero negro dependa de la masa inicial de la estrella, pero también de la composición química inicial de su materia. Los elementos más pesados que el helio favorecen la aparición de vientos estelares, a través de los cuales la estrella pierda masa, lo que limita la masa final del núcleo, y por consiguiente la posibilidad de que se forme un agujero negro. La rotación de la estrella también juega un papel importante, ya que si es rápida permite mezclar el material procesado en su núcleo con el de la envoltura, aportando más combustible y acrecentando la masa del núcleo al final del proceso. Finalmente, la existencia de una estrella compañera gravitatoriamente ligada a la estrella masiva (es decir, la pertenencia de la estrella a un sistema binario) puede alterar la evolución debido a la transferencia de masa entre ambas estrellas, y por consiguiente la compacidad final del núcleo.

Un agujero negro de masa estelar puede ser detectado cuando forma parte de un sistema binario, en el que se encuentra separado de su compañera por una distancia de unas pocas veces el tamaño de esta última. En estos sistemas, al evolucionar la estrella compañera y convertirse en gigante, parte de su envoltura ingresa a la zona de influencia gravitatoria del objeto compacto, cayendo sobre este último. Este proceso se denomina *acreción*, y en el caso de ocurrir sobre un objeto compacto tiene importantes consecuencias observacionales. Como cualquier cuerpo que cae, la materia acreta gana energía cinética a expensas de la energía gravitatoria. Al encontrarse en estado gaseoso, parte de esta energía se utiliza para elevar su temperatura. En otras palabras, al ser acreta el material se calienta, a una temperatura que depende de la compacidad del objeto acreta. En el caso de que éste sea un agujero negro, la temperatura puede alcanzar millones de Kelvin. Por otra parte, cualquier cuerpo con una temperatura superior al cero absoluto emite radiación electromagnética,

siendo la frecuencia de esa radiación mayor a medida que aumenta la temperatura del emisor. A temperaturas de millones de Kelvin corresponde una emisión en el rango de la radiación X. La teoría predice entonces que los sistemas con agujeros negros acretantes deben ser poderosos emisores de rayos X.

Por lo antedicho, cuando en la década de 1960 se detectó la primera fuente celeste emisora de rayos X (Cygnus X-1; Fig. 1), que pudo identificarse ópticamente con una estrella compañera masiva orbitando alrededor de un objeto invisible unas quince veces más masivo que el Sol, ésta se consideró como una fuerte evidencia a favor de la existencia de un sistema binario con un agujero negro. Hoy en día se conocen muchos de estos sistemas, llamados *binarias de rayos X* (Fig. 2), y en una veintena de casos se ha logrado determinar que las masas de los objetos compactos son consistentes con las de los agujeros negros de masa estelar.



Fig. 1: La fuente de rayos X más brillante del cielo, Cygnus X-1. Izquierda, imagen óptica de su localización, tomada por el Deep Sky Survey. Derecha, ilustración artística del sistema de Cygnus X-1, mostrando el agujero negro, el disco de acreción a su alrededor (en amarillo/rojo) y la estrella azul compañera que provee el material acretado. Se observa la eyección de materia en forma de jets desde la región central del disco de acreción. Imágenes tomadas de la página del observatorio Chandra³; créditos: Imagen óptica: DSS; Ilustración: NASA/CXC/M.Weiss.

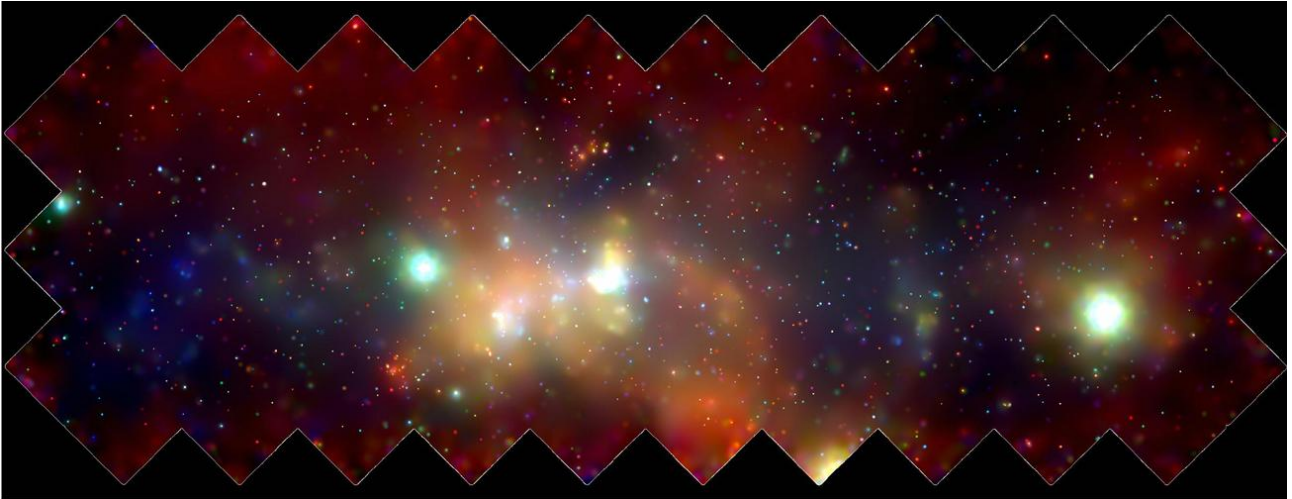


Fig. 2: La región del centro Galáctico vista en rayos X por el observatorio Chandra de la NASA. Los numerosos puntos brillantes que se observan sobre el fondo difuso son en su mayoría binarias de rayos X que contienen objetos compactos acretantes, muchos de ellos agujeros negros. Imagen tomada de la página del observatorio Chandra³; créditos: NASA/CXC/UMass/D. Wang et al.

En los sistemas binarios con objetos compactos, la acreción se produce a través de un disco formado por la materia que cae (Fig. 1). La rotación diferencial de este disco, junto con el campo magnético del material acretado hacen que parte de este último sea eyectado del sistema antes de caer al agujero negro. Este material es acelerado a velocidades cercanas a la de la luz, formando un par de chorros de materia (llamados *jets*) que parten de la región central del sistema y se extienden hasta distancias considerables de la fuente. Los electrones presentes en los jets emiten radiación de sincrotrón, mayormente en la región de radio, infrarroja y visible del espectro electromagnético. Muchas de las binarias de rayos X detectadas presentan emisión de este tipo, que indica la presencia de jets. Estos sistemas son llamados *microcuásares*; para una descripción de su fenomenología, recomendamos leer el artículo de Vila⁴ en el Boletín Radio@stronómico número 30.

Por último, evidencia independiente de la existencia de agujeros negros de masa estelar, y particularmente del proceso de su formación durante el colapso del núcleo de las estrellas masivas proviene de la observación de los fenómenos denominados *erupciones de rayos gamma*. Una reseña sobre estas fuentes puede encontrarse en el artículo de Vieyro⁵ en el Boletín Radio@stronómico número 41, por lo que no nos explayaremos aquí sobre las mismas. Simplemente diremos que las características de estas fuentes, tales como la energía total emitida por las mismas o la rápida variabilidad de la emisión, sugieren que la emisión gamma se produce por la acreción repentina de una fracción importante de la envoltura estelar por parte del agujero negro recientemente formado por el colapso del núcleo estelar (o en una minoría de los casos, por coalescencia de estrellas de neutrones). De acuerdo a los modelos aceptados actualmente, en estos casos estaríamos observando directamente el momento de formación de un agujero negro de masa estelar.

3. Agujeros negros supermasivos

En las últimas décadas se ha descubierto que una parte de las galaxias posee un núcleo activo, que domina la emisión de radiación electromagnética de la galaxia en alguna región del espectro. Esto

no ocurre en las galaxias denominadas normales, en las que la componente no nuclear es la dominante. Dentro de los *núcleos galácticos activos* se encuentran objetos observacionalmente muy diversos, entre otros, los cuásares, los blazars y las galaxias Seyfert. Los *cuásares* son fuentes de apariencia estelar situadas a distancias cosmológicas. Sus luminosidades son extremadamente altas; de hecho son mayores a la luminosidad de toda una galaxia como la nuestra. Emiten en las regiones visible y de rayos X del espectro electromagnético, y algunos de ellos también en ondas de radio. Los *blazars*, similares a los cuásares, presentan una rápida variabilidad e importante polarización en su emisión. Las *galaxias Seyfert*, más cercanas que los anteriores, son galaxias con núcleos similares a los cuásares y que presentan fuertes líneas de emisión en su espectro.

A pesar de la variada fenomenología, el modelo aceptado en la actualidad para explicar las características de estas fuentes propone que todos los núcleos galácticos activos (Fig. 3) corresponden al mismo sistema físico, observado desde distintos ángulos. De acuerdo a este modelo, existe en el centro de cada galaxia un agujero negro muy masivo. La potente emisión del núcleo galáctico activo proviene de la acreción, por parte de este agujero negro, de la materia interestelar de las regiones centrales de la galaxia. Mediciones de la velocidad orbital de las estrellas y del gas en torno al centro de las galaxias con núcleos activos ha permitido determinar las masas de estos agujeros negros, obteniéndose valores de millones a miles de millones de veces la masa solar. Estos agujeros negros son, realmente, supermasivos. Como en el caso de sus análogos de masa estelar, la materia acretada por el agujero negro se calienta, dando lugar a la emisión de alta energía. Además, parte de la materia acretada es eyectada antes de alcanzar el agujero negro, formando potentes jets de materia acelerada a velocidades cercanas a la de la luz, que pueden tener tamaños de varios kiloparsecs. La emisión de sincrotrón de los electrones moviéndose en el campo magnético de los jets es en parte responsable de la observación de los núcleos galácticos activos en todo el espectro electromagnético.



Fig. 3: Uno de los núcleos galácticos activos más cercanos, ubicado en la galaxia Centaurus A, visto en rayos X por el observatorio Chandra de la NASA. Se observa claramente la emisión del núcleo en el centro de la galaxia, y el potente jet (visible desde el centro de la galaxia en dirección al ángulo superior izquierdo de la imagen) que se desarrolla a lo largo de una distancia comparable al tamaño de la galaxia misma. Imagen tomada de la página del observatorio Chandra³; créditos: NASA/CXC/U.Birmingham/M.Burke et al.

Los núcleos galácticos activos pueden detectarse gracias a la acreción de materia sobre los agujeros negros supermasivos. Sin embargo, es posible que no haya en la galaxia suficiente material disponible para acretar, o que la tasa a la cual éste se acreta sea relativamente baja, en cuyo caso la fenomenología descrita no se observaría. Tal es el caso del agujero negro central de la Vía Láctea, nuestra galaxia, que se ha detectado recientemente basándose en la influencia gravitatoria que ejerce sobre las estrellas cercanas al mismo. Las órbitas de estas estrellas permiten estimar su masa en aproximadamente $4.000.000 M_{\odot}$. Si bien existe una radiofuente (Sagittarius A*^{*}; Fig. 4) coincidente con la posición del agujero negro central, cuya emisión podría deberse al proceso de

acreción/eyección, la tasa de acreción estimada es mucho menor a la de un núcleo galáctico activo con un agujero negro de la misma masa.

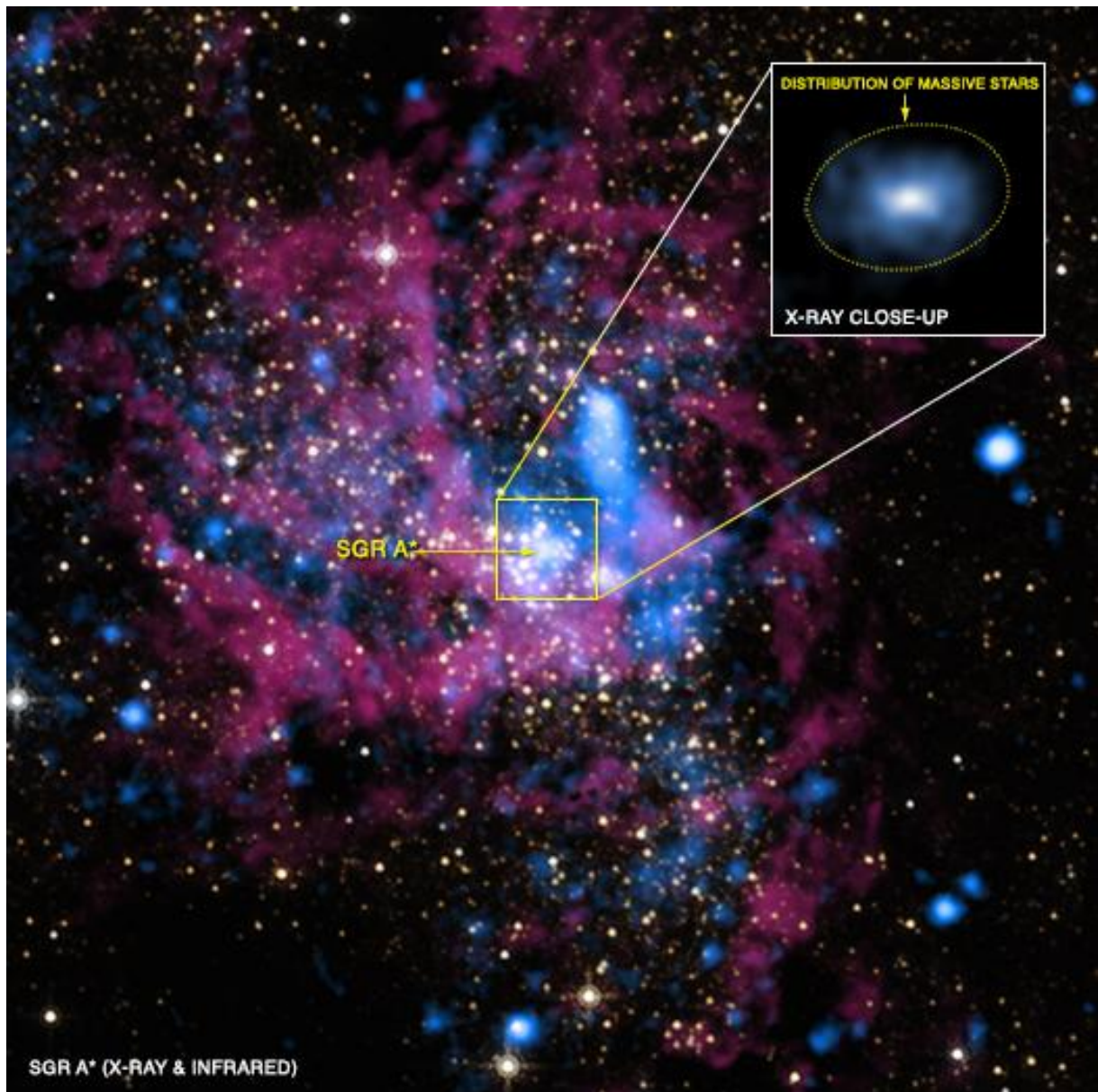


Fig. 4: La región del centro de la Vía Láctea vista en una combinación de infrarrojo y rayos X. Se observa la posición de la radiofuente Sagittarius A*, donde reside en agujero negro supermasivo central de nuestra galaxia. Imagen tomada de la página del observatorio Chandra³; créditos: Imagen X NASA/UMass/D.Wang et al.; Imagen IR: NASA/STScI.

Cabe preguntarse cuál es el proceso por el cual se forman los agujeros negros supermasivos. El mismo es actualmente tema de debate. Suponiendo la existencia inicial de agujeros negros de masa estelar en el centro de las galaxias, que provendrían de la evolución de las primeras estrellas masivas, los mismos pudieron actuar como semillas para la formación de los agujeros negros supermasivos. Estas semillas habrían crecido mediante la acreción de materia del medio interestelar de las galaxias, o por la fusión con otros agujeros negros durante las colisiones y fusiones de galaxias. Evidencia de este crecimiento conjunto del agujero negro y la galaxia es provista por la

existencia de una relación entre la masa de los agujeros negros supermasivos y la del bulbo (componente estelar esferoidal en torno al núcleo) de las galaxias. El problema central de estos modelos es que los agujeros negros de masa estelar que actúan como semillas, sólo disponen para acretar de la materia que logra acercarse lo suficiente a sus regiones de influencia (de unos pocos kilómetros, comparados con los miles de billones de kilómetros del tamaño de las galaxias). Esto hace que el proceso de crecimiento sea extremadamente lento, de modo que el tiempo pasado desde la formación de las galaxias no es suficiente para alcanzar la masa observada.

4. El eslabón perdido

En las últimas décadas del siglo XX comenzó a emerger la idea de que todas las galaxias poseen agujeros negros supermasivos en sus centros. Algunos de ellos se encuentran acretando materia y dando origen a la variedad de fenómenos catalogados como núcleos galácticos activos. Otros, como el que se encuentra en nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, se encuentran en calma, y por lo tanto no son fácilmente detectables. Además, quedaba claro que había una clara relación entre la masa del agujero negro y aquella del bulbo galáctico. Por lo tanto surgió la idea especulativa de que otros sistemas estelares más pequeños que las galaxias pero con cierto parecido a sus bulbos, los cúmulos globulares, podrían también contener agujeros negros.

Los *cúmulos globulares* son aglomeraciones de cientos de miles a millones de estrellas, que orbitan en el campo gravitatorio de las galaxias. En los cúmulos globulares, las estrellas giran en torno al centro de masa común en orbitas no coplanares, lo que da al sistema una apariencia esferoidal. Comparten en esto las propiedades de las componentes esferoidales de las galaxias, y de hecho se ha propuesto que algunos de los cúmulos globulares observados en la Vía Láctea podrían ser las regiones nucleares de pequeñas galaxias satélites, que han sido disgregadas por las fuerzas de marea de la nuestra. Los cúmulos globulares tienen poblaciones estelares extremadamente viejas, al igual que los halos de las galaxias. Sin embargo, difieren de las galaxias en la ausencia de materia oscura en su interior.

Extrapolando la relación observada entre las masas de los agujeros negros y las de los bulbos galácticos, se llega a la predicción de que los cúmulos globulares podrían contener agujeros negros centrales con masas de entre 100 y 10.000 veces la masa del Sol. Por la magnitud de éstas, intermedias entre las masas de los agujeros negros de masa estelar y las de los supermasivos, se ha dado en llamar a estos hipotéticos objetos *agujeros negros de masa intermedia*. Una de las razones más interesantes para investigar su existencia, es que los mismos podrían actuar como semillas para la formación de agujeros negros supermasivos de manera más eficiente que los de masa estelar. De este modo, el tiempo de formación de los agujeros negros supermasivos se acortaría notablemente, haciéndose compatible con el tiempo de evolución de las galaxias mismas.

Otros indicios a favor de la existencia de los agujeros negros de masa intermedia provinieron de la observación de fuentes X ultraluminosas. Como dijimos anteriormente, el proceso de acreción sobre un objeto compacto produce una enorme cantidad de energía, que se traduce en una alta luminosidad de las correspondientes fuentes. Sin embargo, ésta tiene un límite, llamado *límite de Eddington*. Al propagarse hacia afuera del sistema, la radiación electromagnética emitida por estas fuentes ejerce presión sobre el material acretado, creando sobre el mismo una fuerza que se opone a la gravedad del objeto compacto. Si la luminosidad es muy alta, esta fuerza es capaz de contrarrestar la gravedad, deteniendo la acreción. La luminosidad de Eddington es proporcional a la

masa del objeto acretante, y equivale aproximadamente 100.000 veces la luminosidad solar, para un objeto con una masa igual a la del Sol. La observación de fuentes X con luminosidades cientos de veces superiores a la luminosidad de Eddington correspondiente a los agujeros negros de masa estelar típicos, no puede ser explicada entonces a partir de la acreción sobre estos objetos. La explicación de estas observaciones requiere de la existencia de objetos compactos con masas de cientos a miles de veces la solar, justamente en el rango predicho para los agujeros negros de masa intermedia. La coincidencia posicional de algunas de estas fuentes con cúmulos globulares extragalácticos proporcionó una base aún más creíble para la existencia de estos objetos.

Por otra parte, desde el punto de vista teórico, las investigaciones mostraron la existencia de un proceso por el cual los agujeros negros de masa intermedia podrían formarse en las regiones centrales de cúmulos estelares densos, como son los globulares. En los centros de estos sistemas la densidad de estrellas es muy grande, encontrándose decenas a cientos de miles de estrellas en una esfera de un parsec de radio. Para comparación, en la vecindad del Sol hay apenas una estrella en una esfera del mismo tamaño. Por lo tanto, en los centros de estos cúmulos, las colisiones y fusiones entre distintos objetos estelares son frecuentes. Simulaciones numéricas del movimiento de las estrellas en los cúmulos globulares muestran que en estas condiciones, los agujeros negros formados por las estrellas masivas del cúmulo colisionan frecuentemente, agregándose para formar un agujero negro con una masa de entre 100 y 10.000 masas solares, en otras palabras, un agujero negro de masa intermedia.

Sin embargo, la detección directa de los agujeros negros de masa intermedia no es sencilla. Algunos investigadores intentaron medir la influencia gravitatoria de estos hipotéticos objetos sobre las estrellas del cúmulo en el que se encuentran. Para ello hicieron determinaciones muy precisas de la variación de la densidad de estrellas con la distancia al centro del cúmulo. En caso de existir un objeto compacto, la densidad de estrellas debería crecer cerca del centro del cúmulo, en caso contrario se estabilizaría. A pesar de que en algunos casos se observó el primer comportamiento, no fue posible determinar más allá de toda duda, que el mismo se debía a un único agujero negro de masa intermedia y no a un conglomerado de objetos compactos (por ejemplo, estrellas de neutrones) suficientemente juntos como para no poder distinguirlos individualmente. Investigaciones similares se realizaron midiendo la velocidad de las estrellas más cercanas al centro del cúmulo. En caso de existir un agujero negro de masa intermedia, su atracción gravitatoria permitiría a las estrellas orbitar más rápido sin ser expulsadas del cúmulo, que lo que lo harían si el agujero negro no existiera. Nuevamente las investigaciones fueron inconcluyentes, mayormente debido a que la precisión de los datos provistos por los telescopios de vanguardia se encuentra al límite de la necesaria para distinguir entre ambas hipótesis.

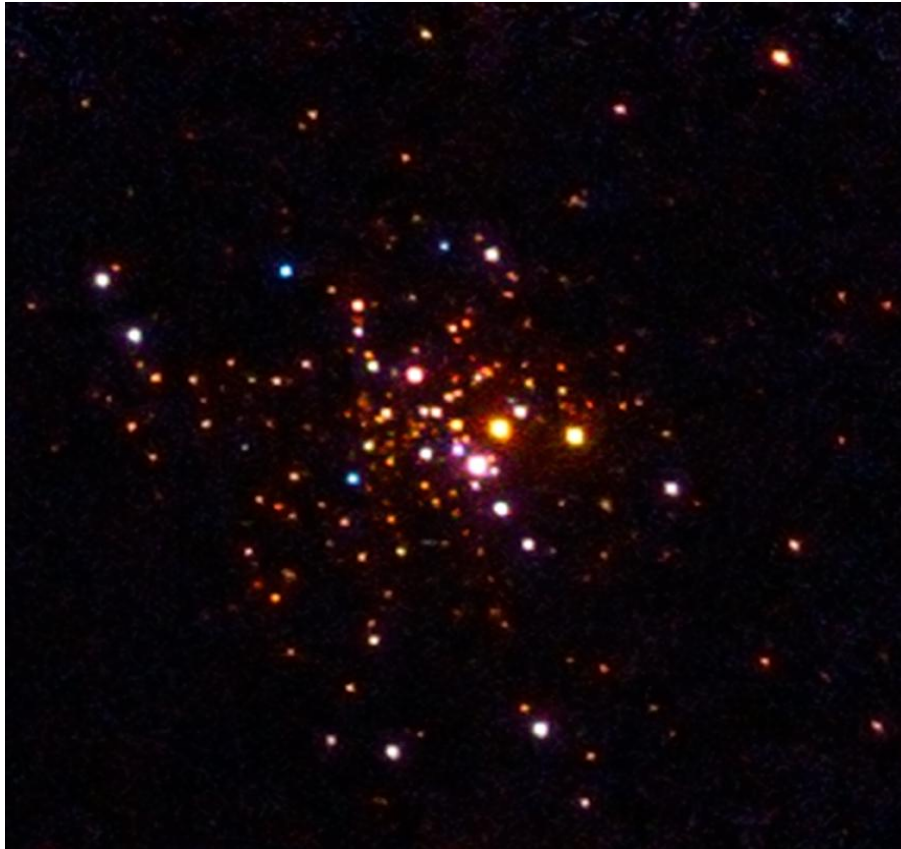


Fig. 5: Imagen del cúmulo globular 47 Tucanae en rayos X. Se observa en ella una gran cantidad de fuentes cuya emisión es producida por el proceso de acreción sobre un objeto compacto. Sin embargo, ninguna de ellas tiene las propiedades esperadas para un sistemas con un agujero negro de masa intermedia. Imagen tomada de la página del observatorio Chandra³; créditos: NASA/CXC/Michigan State/A.Steiner et al.

Paralelamente, diversas investigaciones recorrieron un camino diferente, intentando detectar la emisión en rayos X debida a la acreción del material interestelar del cúmulo por parte del agujero negro de masa intermedia (Fig. 5), o la emisión en radio atribuible a posibles jets producidos por dicho proceso. Solamente en algunos casos se han detectado fuentes de radiación centrales consistentes con lo que se esperaría observar de un agujero negro de masa intermedia. Pero la interpretación de las observaciones es compleja, y aún no hay consenso en la comunidad astrofísica acerca de que los resultados evidencien la presencia de estos hipotéticos objetos más allá de toda duda. Por otra parte, la falta de emisión en muchos cúmulos globulares no necesariamente implica la inexistencia de los agujeros negros de masa intermedia. Es posible que el tenue medio interestelar de estos sistemas no provea una tasa de acreción suficiente para generar una emisión en rayos X detectable. también es posible que el proceso de acreción sobre estos agujeros negros no produzca jets, eliminando así la emisión en ondas de radio.

5. Conclusiones

La investigación de los agujeros negros permite principalmente comprender uno de los fenómenos más interesantes de la naturaleza, como es la interacción gravitatoria. Pero también brinda información para resolver cuestiones pendientes en distintas áreas de la Astrofísica, como la evolución estelar o la formación y el crecimiento de las galaxias. Para lograr estos objetivos, es necesario detectar estos objetos en distintos ambientes astrofísicos y determinar sus propiedades. Si bien no es posible observar los agujeros negros directamente, la influencia gravitatoria sobre su entorno, y en particular el proceso de acreción, han permitido determinar más allá de toda duda razonable la existencia de estos objetos en diversos sistemas astrofísicos. La emisión de sistemas tan diversos como algunas binarias de rayos X o microcuásares, las erupciones de rayos gamma y los núcleos galácticos activos pueden explicarse hoy día suponiendo que todos ellos obtienen su energía del proceso de acreción de materia sobre un agujero negro. Las diferencias en la masa de este último (de masa estelar o supermasivo) y en la fuente de la materia acreta son las que distinguen cada tipo de fuente, y originan su rica fenomenología. En el caso de los agujeros negros de masa estelar, su origen se comprende como resultado del proceso evolutivo de las estrellas de gran masa. Para los agujeros negros supermasivos ubicados en los centros de las galaxias, su origen no se conoce completamente aún, aunque se especula que deberían haber crecido a partir de otros agujeros negros menos masivos que actuaran como semillas. La posible existencia de agujeros negros de masa intermedia, propuesta en las últimas dos décadas, no solamente proveería un tipo de semilla plausible, sino también excelentes laboratorios para el estudio de los agujeros negros, y finalmente de la gravitación.

6. Referencias

- ¹ Romero, G.E., 2008, "Introduction to black holes", en "Compact Objects and their Emission", Asociación Argentina de Astronomía Book Series 1, G.E. Romero & P. Benaglia (eds.)
- ² García, F. "Estrellas de neutrones o neutrones estrellados", en Boletín Radio@stronómico 37
- ³ <http://xrtpub.harvard.edu/>
- ⁴ Vila, G.S., 2010, "Microcuásares: fuentes de radiación de alta energía en nuestra galaxia", en Boletín Radio@stronómico 30
- ⁵ Vieyro, F.L., 2012, "Erupciones de rayos gamma", en Boletín Radio@stronómico 41

7. Sobre el autor

El Dr. Pellizza es Lic. en Física por la UBA (1998) y Dr. en Astronomía por la UNLP (2003) siendo el tema de su tesis "*Globular cluster systems in hierarchical clustering scenarios*". Estuvo dos años en el Commissariat à l'Énergie Atomique, en Saclay, Francia con una beca post doctoral (2004-2005), luego en 2006 volvió a CONICET también con una beca post doctoral y posteriormente, desde 2007, como investigador.

Trabajó en el Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE) durante todo ese tiempo (excepto los dos años en Francia).

El Dr. Pellizza se dedica a investigar el origen de los objetos compactos (particularmente agujeros negros) de masa estelar e intermedia, a través de observaciones de fuentes que los contienen (binarias de rayos X, *gamma-ray bursts*) y de simulaciones numéricas de sus poblaciones y de su

emisión electromagnética de alta energía.

Integra el grupo de investigación [Grupo de Astrofísica Relativista y Radioastronomía \(GARRA\)](#)

Desde setiembre de 2013 integra el plantel científico del IAR.