

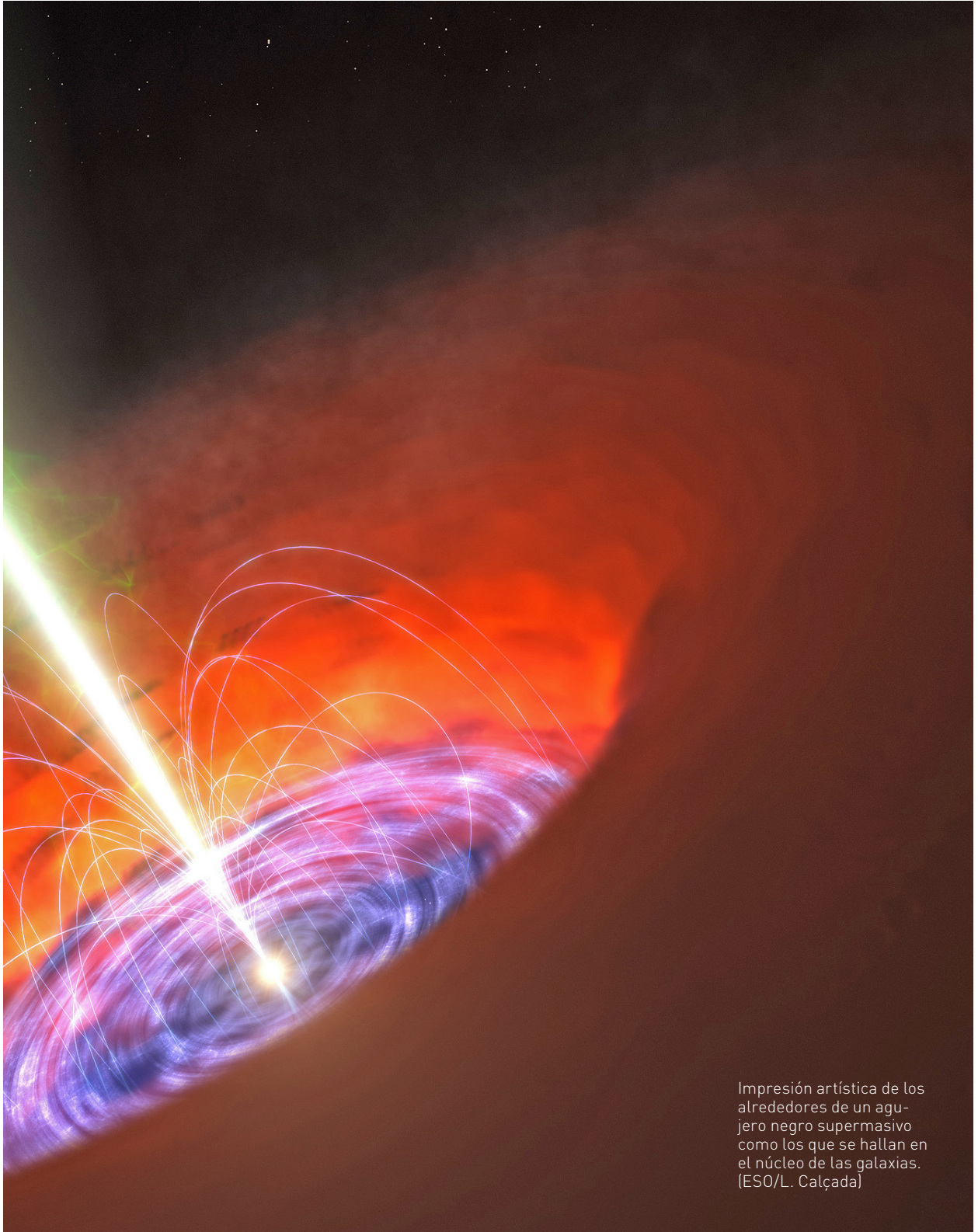
LOS MAYORES AGUJEROS NEGROS DEL UNIVERSO

LOS MAYORES AGUJEROS NEGROS DEL UNIVERSO SE HALLAN EN EL CENTRO DE LAS GALAXIAS, PERO SI YA DE POR SÍ SE ESCAPAN DE NUESTRA IMAGINACIÓN, VAMOS A HABLAR DE LOS COLOSALES ENTRE LOS GIGANTES.

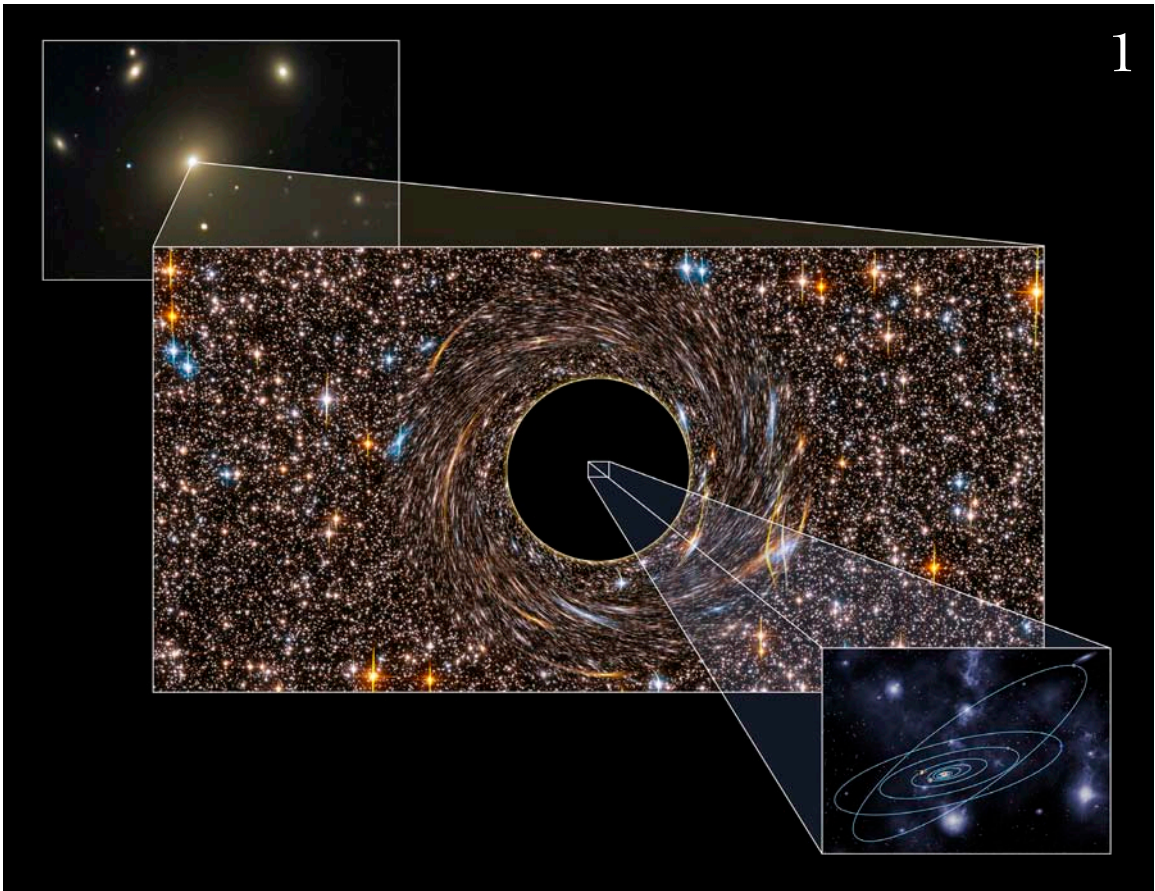
FERNANDO BUITRAGO ALONSO



Artículo exclusivo
colaboración de la
Sociedad Española
de Astronomía



Impresión artística de los alrededores de un agujero negro supermasivo como los que se hallan en el núcleo de las galaxias. (ESO/L. Calçada)



«Glaciers melting in the dead of the night and the superstars sucked into the super massive black hole.»
Super Massive Black Hole – Muse, de su disco *Origin of symmetry*

Cuando tenía trece o catorce años, mi padre se había dado cuenta de que algo astronómico bullía dentro de mi cabeza. Y un día, con su pedido del Círculo de Lectores, me trajo de regalo un libro de Stephen Hawking que se llamaba *Agujeros negros y pequeños universos y otros ensayos*. Quédeme como hipnotizado leyendo y releendo mil veces sus páginas. Los agujeros negros contienen en ellos la fascinación por lo que no entendemos, por el límite y lo extremo. Como dice el propio

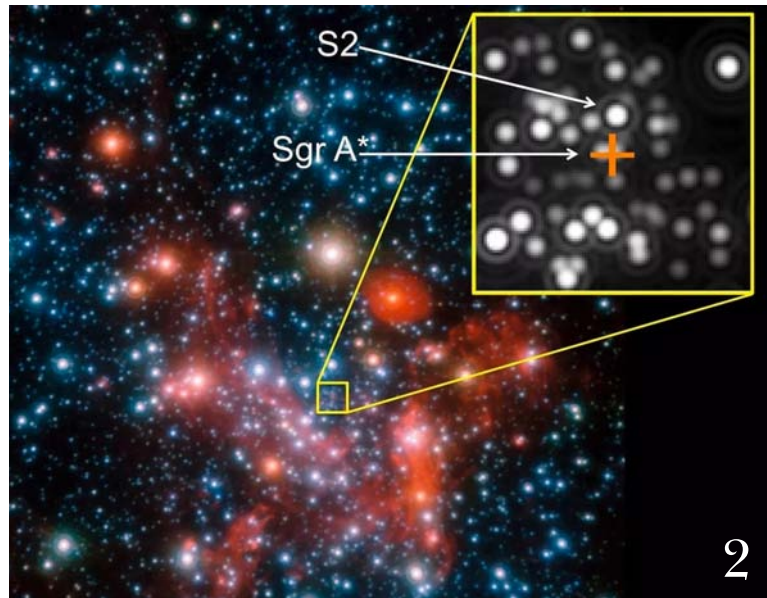
Hawking en otro libro maravilloso, *Corazones solitarios del Cosmos*, llamar a estos cuerpos así fue una jugada maestra de John Wheeler porque crea una conexión, relacionándolos con el miedo de las personas a ser destruidos o tragados. Es por esto que la gente siente una atracción casi mística hacia ellos.

Mucho se ha escrito sobre ellos también en esta revista, por ejemplo en el excepcional artículo «Galaxias activas» de mi amiga y colaboradora Montserrat Villar

Martín en junio de 2015. Hoy vamos a hablar de ellos y más concretamente de los absolutamente gigantes. El principiante en astronomía seguro que ha escuchado que los agujeros negros se originan en las supernovas de estrellas de masas más altas. También sabrá que en el interior de (no todas) las galaxias, en su mismo centro, nos encontramos con estos objetos. ¿Son iguales los agujeros negros estelares y los de los centros galácticos? No, estos últimos son mucho más pesados. Normalmente millones de veces más. Y recordemos que la cantidad de masa que contienen es proporcional a su tamaño y que son objetos tridimensionales cuyo horizonte de sucesos (el fa-

FIGURA 1. Arriba a la izquierda, la galaxia más brillante del cúmulo Abell 1367; en el centro, composición artística de su agujero negro central (cuya gravedad modifica la trayectoria de la luz de las estrellas que están de fondo), abajo a la derecha, comparación del tamaño de este objeto con nuestro Sistema Solar hasta la órbita de Plutón. [P. Marenfeld/NOAO/AURA/NSF]

FIGURA 2. Imagen del centro de la Vía Láctea, con el extracto ampliado mostrando la posición de Sagitario A* y la estrella S2 a la que nos referimos en el texto. Es tanta la cantidad de estrellas en el centro galáctico que tenemos que recurrir a técnicas de óptica adaptativa para su caracterización. Por supuesto, estas imágenes tienen que ser tomadas en el infrarrojo debido al altísimo grado de extinción en esta parte de la Galaxia. [ESO/MPE/S. Gillessen *et al.*]



moso lugar a partir del cual ni siquiera la luz puede escapar) es en realidad una esfera y no un agujero o cualquier otro tipo de superficie.

Centrándonos en estos agujeros negros supermasivos (normalmente denominados SMBH según sus siglas en inglés) en el centro de las galaxias (Figura 1), el de nuestra Vía Láctea se llama Sagitario A* debido a su posición en la bóveda celeste. Se encuentra a unos ¡250 mil billones de kilómetros de distancia! y tiene una masa de ¡cuatro millones de veces la del Sol! De nuevo, la astronomía falla como una escopeta de feria haciéndonos entender el universo. Creemos que lo hacemos porque manejamos los números, pero los seres humanos no somos capaces de concebir en nuestras cabezas estas ingentes cantidades.

Estos agujeros negros supermasivos muchas veces se encuentran en un estado más o menos latente, como Sagitario A*, porque no hay mucha materia a su alrede-

dor que caiga en ellos. De hecho, nuestro agujero negro supermasivo fue noticia en agosto pasado debido al hecho de que una de las estrellas en sus proximidades pasó por su pericentro (punto de máximo acercamiento) y se pudo medir el desplazamiento al rojo de su luz debido al fuerte campo gravitatorio del agujero negro (Figuras 2 y 3). Pero vamos al grano. En el momento que estos astros tienen la posibilidad de acretar gran cantidad de materia pasan de ser el Doctor Jekyll a Mister Hyde, radiando su disco de acreción una inmensa cantidad de energía y convirtiéndose en un núcleo de galaxia activa o AGN según otra vez sus siglas en inglés. ¿Cuáles son las formas de emitir toda esa energía? Una son los famosos chorros que parecen salir de estos centros galácticos cuando son observados en el rango de las ondas de radio. Esta fue la primera forma en que se detectaron estos núcleos de galaxia activa y, por tanto, ha permanecido en el imaginario co-

lectivo, también por el hecho de que hasta finales de los noventa era la forma más simple de detectar galaxias lejanísimas. Sin embargo, para sorpresa de propios y extraños, este mecanismo es el que se da en los AGN más débiles. Cuando la acreción de materia es mucho más brutal, tanta es la radiación que escapa de estos objetos que es capaz de calentar todo el medio interestelar en sus proximidades inhibiendo la condensación de gas en estrellas dentro de su galaxia huésped e incluso en las galaxias cercanas.

¿Son estos últimos los famosos cuásares? Sí y no, cuásar es una definición observacional. Se llaman así a aquellas galaxias cuya luminosidad de su AGN es superior al brillo combinado de ¡todas sus estrellas! (véase la Figura 4). Hablemos o no de cuásares, advertimos que se da un proceso de retroalimentación: el gas entra en la galaxia, es absorbido por su agujero negro supermasivo que empieza a radiar intensamente, y esta emisión caliente

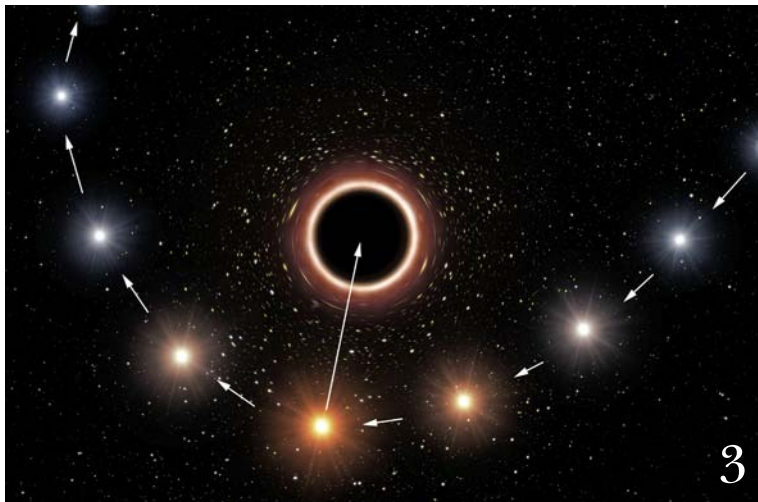


FIGURA 3. Concepción artística del paso de la estrella S2 por el pericentro de su órbita alrededor de Sagitario A*. La velocidad que alcanzó en ese momento fue un nada desdeñable 2 % de la velocidad de la luz. Gracias a las mediciones que llevamos haciendo desde finales del siglo XX, se ha podido ver cómo esta estrella cerraba su órbita en estos últimos dieciséis años, lo que ha permitido llevar a cabo el test de la teoría de la Relatividad que hemos descrito. (ESO/M. Kornmesser)

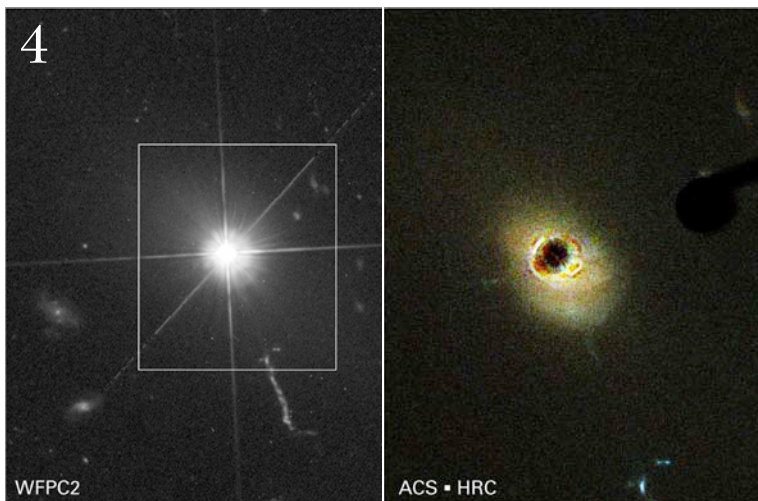
FIGURA 4. Imágenes del cuásar 3C 273 por el Telescopio Espacial Hubble. De hecho, este fue el primer púlsar que se detectó. Recomiendo una vez más que se consulte el libro *Corazones solitarios del Cosmos*, donde se narran los avatares de este proceso. A la izquierda vemos la imagen normal del cuásar, incluso la emisión de uno de sus chorros que se encuentra en la parte inferior derecha. El cuadrado blanco representa el espacio ocupado por la imagen de la derecha, donde se ha modelado la emisión de la fuente puntual central y se ha sustraído, mostrando la galaxia huésped del cuásar. Es por esta razón que nos encontramos en su interior un hueco negro y esos reflejos. Todo ello es indicativo de nuestra incertidumbre en la forma exacta de la emisión central. (NASA, J. Bahcall -IAS-, A. Martel, H. Ford -JHU-, M. Clampim, G. Hartig -STScI-, G. Illingworth -UCO/Lick Observatory-, ACS Science Team y ESA)

el gas y por ello frena su caída al agujero negro. Este mecanismo es el culpable de que las galaxias no crezcan *ad infinitum*, provocando que galaxias con una masa en estrellas un par de veces mayor que nuestra Vía Láctea (o sea, para galaxias más masivas que Andrómeda, nuestra hermana mayor cósmica) sean muy escasas. De nuevo, y no me gusta escribir estos números porque no los conseguimos aprehender, diría que galaxias con masas estelares superiores a un billón de veces la de nuestro Sol son extremadamente raras. Este equilibrio entre lo que entra y lo que sale ha creado una relación empírica entre la masa de los agujeros negros supermasivos y la de sus galaxias huésped. A mayor masa del gigantesco agujero negro, la galaxia, o mejor dicho su esferoide central al cual llamamos bulbo, tiene que ser más masivo porque de aquí viene el material que cae al monstruo en su interior. El epítome en estos casos suelen ser las galaxias elípticas, que al fin y al cabo son bulbos colosales de escala galáctica, y que por ende suelen poseer los mayores agujeros negros.

Basándonos en esta relación, los mayores agujeros negros del universo deben estar escondidos en las mayores galaxias. Con esta idea obtuve observaciones en el *Very Large Telescope* de Chile para la mayor galaxia conocida, IC1101, y mi idea es medir con un modelado computacional las velocidades de las estrellas de esta galaxia para que estas me proporcionen la masa de su agujero negro central. En estos momentos estoy analizando los datos con mis colegas del Instituto de Astrofísica de Canarias y la ESO, y el valor esperado para la masa del agujero negro varía entre diez mil y cincuenta mil veces la de Sagitario A*. ¿A que se han perdido ya con todos estos números que barajamos? Si se lo digo con palabras, sería como tener toda la masa de nuestra Galaxia dentro de un agujero negro (Figura 5). Eso sí, para formar una galaxia tan bestia que pueda contener un objeto así, la única posibilidad es que hayamos tenido múltiples fusiones de galaxias. De hecho, la jerga para llamar a estas galaxias enormes como IC1101 sin otras galaxias grandes

a su alrededor es «grupo fósil», porque se cree que en algún momento de su historia todas las galaxias a su alrededor se fusionaron para formar una sola. En el caso excepcional de IC1101 puede que hablemos incluso del resultado final de la fusión de dos cúmulos de galaxias.

Pudiera darse el caso de que en vez de un solo agujero negro nos encontráramos con varios en el interior de IC1101. O podríamos fusionarlos en uno solo, como las colisiones de agujeros negros que hemos visto con el telescopio de ondas gravitato-



rias LIGO, pero esta vez con objetos millones de veces mayores. Sin embargo, es extremadamente difícil que esto ocurra. Nos referimos al conocido «problema del pársec final» (siendo un pársec la medida de distancia normalmente usada en la astronomía profesional y que equivale a 3,26 años luz). Cuando dos galaxias se fusionan, sus agujeros negros supermasivos, al igual que sus estrellas, no chocan sino que los cuerpos que componen cada galaxia pasan unos a través de los otros debido a la separación grandísima que hay entre ellos. Poco a poco, los múltiples tirones gravitatorios que experimentan entre sí y con el resto de astros van aproximando los dos agujeros negros, y terminan formando un sistema binario. El inconveniente es que cuanto más se acercan, el volumen del espacio que les puede influenciar para seguir haciéndose más pequeña su órbita es cada vez más reducido. Además, perder energía por medio de la emisión de ondas gravitatorias no es una opción porque estas solo son importantes a distancias mucho menores, del orden

de 0,01-0,001 pársec. Es por esto que para que la binaria se haga más pequeña que un pársec es condición *sine qua non* que haya estrellas o gas en cantidades significativas muy cerca para que la coalescencia tenga lugar. La misma física aparece reflejada en ese otro libro de cabecera para todo científico como es *Biografía de la Tierra* (disponible gratis en eprints.ucm.es/13263), de nuestro geólogo planetario Paco Anguita, donde narra cómo en el principio del Sistema Solar los embriones planetarios necesitaban de gas y polvo en sus inmediaciones para ser capaces de colisionar con otros protoplanetas. ¡Qué espectáculo el universo donde los mismos procesos físicos se pueden ver en escalas tan distintas!

El lector avezado dirá ahora que cuando se observen estas colisiones en LIGO, el detector deberá medir una señal millones de veces mayor que la que se ha visto hasta ahora para agujeros negros de origen estelar. No es así, porque el diferente rango de masas de los objetos en interacción implica a su vez un rango distinto de frecuencias. La única forma

a nuestra disposición de detectarlas consiste en medir la variación de la llegada de las señales de púlsares (o sea, estrellas de neutrones giratorias) que rotan en escalas de milisegundos, ya que estas son relojes ultraprecisos que tenemos distribuidos por todo el espacio interestelar (Figura 6). Querido lector: ya no hay adjetivos para referirnos a tanta maravilla. Esta técnica que acabo de describir está todavía en ciernes, pero también decíamos lo mismo sobre LIGO hace no tanto, ¿verdad?

Por si fuera poco, hay que reconocer que estos mega agujeros negros están de moda. Primero estamos esperando todavía noticias del llamado «telescopio del horizonte de sucesos», o EHT, que es la combinación de todos los radiotelescopios más potentes en tierra para ver si conseguimos resolver el horizonte de sucesos de Sagitario A*. En otras galaxias cercanas hemos también detectado emisiones transitorias en sus centros que han sido asociadas a eventos de ruptura de marea, o sea, estrellas que se han acercado más de la cuenta al agujero negro supermasivo y han sido hechas trizas. También hemos recientemente encontrado galaxias que han permanecido intactas casi desde los orígenes del universo (las llamadas galaxias reliquia, ver mi artículo «Monstruos galácticos» en esta revista en junio de 2017) cuyos agujeros negros son mucho más masivos de lo que esperaríamos para galaxias de esa masa. Y por último, en los confines del universo, hace 13 000 millones de años (recordemos que en este nuestro cosmos distancias temporales se pueden llegar a traducir

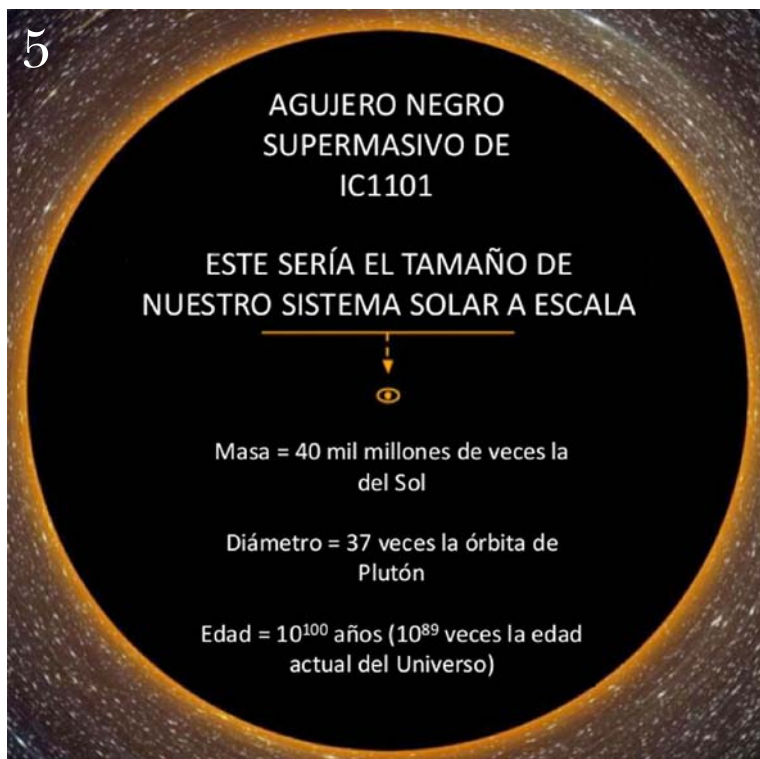
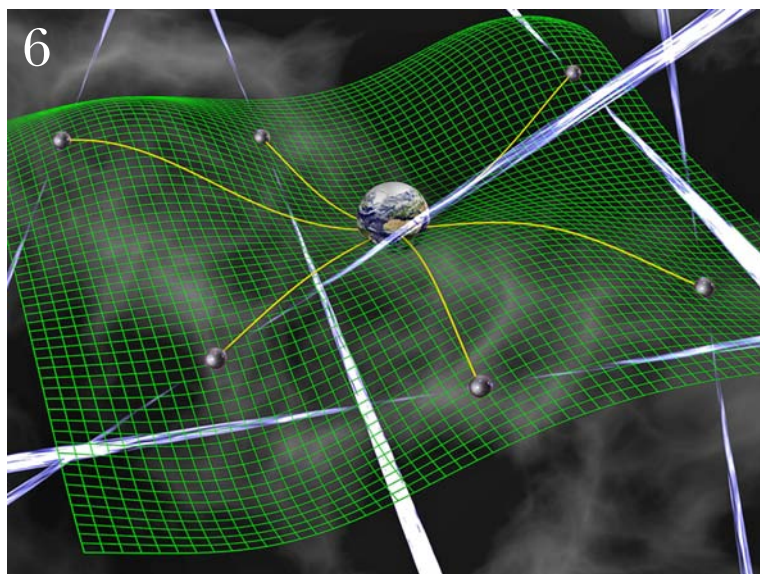


FIGURA 5. Tamaño comparativo del agujero negro de IC1101 y el Sistema Solar. El radio de Sagitario A* es más pequeño que la mitad de la distancia de Mercurio al Sol. (Adaptado de Robert Sullivan)

FIGURA 6. Otra visión artística de cómo la Tierra se encuentra dentro de la curvatura del espacio-tiempo, y cómo nos llegan las señales de radio de los púlsares. Personalmente, cada vez que pienso en ellos me viene a la cabeza la canción «Pulstar» de Vangelis con la que empezaban, entre otros, los boletines informativos de la Cadena COPE. (David Champion/ NASA/JPL)

FIGURA 7. ¿Estábamos pensando en un objeto bestial? ¡Pues lo es! Lo único es que está en la otra punta del universo. Aquí vemos cinco imágenes del cuásar J1342+0928, que actualmente ostenta el record como el cuásar más lejano conocido. Su luz ha viajado la friolera de más de 13 000 millones de años hasta alcanzar nuestros ojos. De izquierda a derecha, tenemos imágenes desde el rango visible (izquierda) hasta el infrarrojo (las últimas cuatro). Este objeto está tan lejos que toda su luz está desplazada a este último tipo de luz debido a la expansión del universo. (Tomado de Bañados E. et al. 2017, *Nature*, 553, 473)

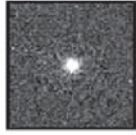
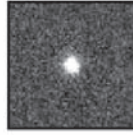
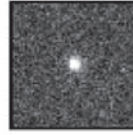
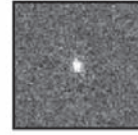


en distancias espaciales debido a la velocidad finita de la luz) hemos detectado agujeros negros supermasivos con una masa solo un poco menor que la de IC1101 (Figura 7). ¿Cómo es posible formar estos ciclópeos objetos en

un universo cuya edad según las últimas estimaciones es tan solo (en comparación con la anterior) 800 millones de años más antigua?

Incluso si uno de estos agujeros negros hubiese sido formado

en el Big Bang, este tendría que acretar materia a un ritmo superior al máximo posible que marca aquella retroalimentación a la que nos referíamos al principio del presente artículo. A este máximo teórico se le llama «el límite de Eddington». Se han visto agujeros negros absorbiendo materia a un ritmo súper-Eddington, si bien se piensa que es un estado temporal y se le da una explicación más o menos bizantina. Otra posibilidad es que las *semillas* que crean estos agujeros negros supermasivos sean ya bastante grandes y así puedan llegar con un ritmo de acreción plausible a las masas que han sido medidas en cuerpos como

$z_{DE,3\sigma} > 23.32$  $J1 = 20.73 \pm 0.03$  $J = 20.30 \pm 0.02$  $H = 20.16 \pm 0.03$  $K_s = 20.10 \pm 0.04$ 

J1342+0928. Estas semillas exóticas podrían ser agujeros negros creados en las supernovas de las hipotéticas estrellas de Población III (aquéllas de primera generación formadas solo a partir de hidrógeno y helio que se piensan que pueden tener masas mucho más altas que las normales) o incluso agujeros negros formados por el colapso directo de las grandes cantidades de gas que había en la infancia del universo.

Estamos sin lugar a dudas bordeando los límites del espacio y del tiempo en estos estudios. Muchos apuntan a que las dos condiciones (acreción súper-Eddington y la existencia de una semilla exótica) son necesarias para que estos objetos estén ya presentes tan temprano en el universo. Quizás el debate más apasionante respecto a ellos es el problema del huevo y la gallina que crean: ¿son necesarios los agujeros negros supermasivos para que haya galaxias o viceversa? Se puede objetar el hecho de que en el centro de algunas galaxias no se han encontrado agujeros negros (como ocurre en una galaxia espiral tan cercana y tan grande como M 33, la hermana pequeña de Andrómeda y la Vía Láctea), pero también es muy sospechoso que agujeros negros tan grandes como los que hemos descrito en este artículo hayan sido ya detectados en los albores del universo o que las galaxias reli-

quias combinen agujeros negros extremadamente grandes con la evidencia de que no han sido modificadas desde hace muchísimo tiempo.

Como ven, este tema no puede ser cerrado porque todavía existen innumerables interrogantes sobre estos objetos. Volviendo al libro al que me refería al empezar el artículo, el que me regaló mi padre, allí se decía que estos agujeros negros, al ser tan grandes, tienen un campo gravitatorio que varía suavemente, y quizás podrían ser usados en un futuro para viajes interestelares si fuéramos capaces de evitar la singularidad en su interior. Ojalá. Pero puede que el hecho más sorprendente sobre ellos (¿todavía hay más?) es que serán los objetos que más «vivirán» del universo. Dentro de eones y eones, cuando el hidrógeno para formar estrellas sea tan escaso que no se pueda condensar en estos objetos, cuando cualquier otra fuente de luz y calor se haya extinguido para siempre (la archiconocida muerte térmica del cosmos) estos objetos estarán allí, impasibles, mirando a la nada. Eso sí, todo se muere, lo sabemos por el segundo principio de la Termodinámica. Hasta los propios agujeros negros, que inexorablemente emiten radiación Hawking hasta que se evaporan—esta es sin duda la contribución por la que Stephen Hawking es

y será más recordado— lo harán. Sin embargo, el ritmo de esta emisión es inversamente proporcional a la masa del agujero negro. Un agujero negro supermasivo, por tanto, tardará un gúgol de años en evaporarse. Me imagino que nunca habrán oído esta palabra, gúgol. Un número precioso. Es un uno acompañado de cien ceros. De hecho, objetos del tipo del agujero negro de una galaxia como IC1101 u otros todavía mayores que se formen a lo largo del tiempo serían incluso más longevos, hasta un millón de veces esta cantidad.

Y desde su torre de marfil, testigos de los últimos estertores del universo moribundo, pronunciarán los (estos sí inmortales) versos de Percy Shelley:

«Mi nombre es Ozymandias,
rey de reyes:

¡Contemplad mis obras, poderosos,
y desesperad!

Nada queda a su lado. Alrededor
de la decadencia

de estas colosales ruinas, infinitas
y desnudas

se extienden, a lo lejos, las solitarias
y llanas arenas.» (A)

Fernando Buitrago Alonso, astrofísico salmantino, trabaja en el Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço, Lisboa, Portugal.

