

# NUEVO NOBEL PARA LA ASTROFÍSICA

Los agujeros negros siguen en la cresta de la ola y, en gran medida gracias a ellos, la astrofísica se mantiene en el centro de la actualidad científica. No es extraño que estos objetos, los más fascinantes del universo, traspasen las fronteras de la astrofísica, pues sus asombrosas propiedades permiten realizar los tests más exigentes que podamos imaginar a la relatividad general. Los agujeros negros captan pues la atención de un gran abanico de personas, desde los físicos más fundamentales hasta los filósofos de la naturaleza, pasando por todos los que sienten curiosidad por los prodigios de nuestro mundo.



**Rafael Bachiller**  
Director del Observatorio  
Astronómico Nacional (OAN, IGN)  
*r.bachiller@oan.es*

En 2017, mientras la Fundación Nobel premiaba la detección de ondas gravitacionales que delatan las colisiones de agujeros negros de masas estelares, el Event Horizon Telescope (EHT) realizaba las observaciones revolucionarias que conducirían a la primera imagen de la proximidad del agujero negro supermasivo en Messier 87. Y no habíamos terminado de celebrar estos resultados, que se hicieron públicos en abril de 2019, cuando recibimos la noticia de que el Nobel de Física 2020 ha sido otorgado a Reinhard Genzel, Andrea Ghez y Roger Penrose por sus descubrimientos sobre estos objetos que a todos nos apasionan.

## VIRTUOSISMO OBSERVACIONAL

Genzel y Ghez han sido distinguidos con la mitad del premio por “el descubrimiento de un objeto compacto supermasivo en el centro de la Vía Láctea”. Reinhard Genzel (MPE, Múnich) y Andrea Ghez (UCLA, Los Ángeles) han estado monitorizando los movimientos de las estrellas próximas a SgrA\* durante casi tres décadas. El grupo de Genzel viene utilizando los telescopios de ESO en Chile, mientras que el de Ghez ha realizado sus observaciones con los telescopios Keck en Hawái.

Todos sabemos las dificultades que existen para penetrar en las regiones centrales de la Galaxia y observar las estrellas individuales que allí se encuentran. Las densidades columnares de polvo son tan descomunales en esa dirección que, de cada mil millones de fotones que son emitidos por una estrella en esa zona, tan solo uno de ellos llega a nuestros telescopios. Por eso ambos equipos trabajaron en el infrarrojo cercano (en torno a 2 micras de longitud de onda), donde la extinción visual es un orden de magnitud menor que en el óptico.

Pero la extinción interestelar no es el único problema para observar estrellas individuales cerca del centro galáctico, la turbulencia en la atmósfera terrestre limita la resolución angular incluso en los telescopios mayores situados en tierra y, por ello, ambos equipos contribuyeron, en los primeros tiempos, a desarrollar la técnica de *speckle* en el infrarrojo.

Para los astrónomos más jóvenes, recordaré que esta técnica de ‘alineal-y-sumar’ consiste en tomar exposiciones individuales de una décima de segundo de duración, alinear las imágenes espacialmente y

combinar todas ellas. Al realizarse con tiempos de exposición tan cortos, las imágenes *speckle* están limitadas a estrellas relativamente brillantes. Genzel la aplicó inicialmente en el telescopio NTT de La Silla (que tiene un espejo de 3,6 metros de diámetro) en los años 1990, pero necesitaba observar estrellas más débiles y con mejor resolución angular.

Las limitaciones del *speckle* pudieron ser superadas con las técnicas de óptica adaptativa que fueron desarrolladas en el último tercio del siglo pasado y que fueron empleadas por los equipos de Genzel (en los VLT) y Ghez (en los Keck) a principios de los 2000. La utilización de una estrella artificial (un láser que excita el sodio de la alta atmósfera) y un espejo secundario deformable permite, realizando iteraciones en bucle, compensar las aberraciones en tiempo real y lograr largos tiempos de exposición. Se pueden obtener así los espectros de las débiles estrellas infrarrojas.

En concreto, Genzel estuvo usando, en el VLT, el instrumento NACO para las imágenes y SINFONI para la espectroscopía, detectando así el movimiento orbital de varias estrellas en torno al centro galáctico. Pronto se hizo famosa entre los astrónomos la estrella etiquetada como S2 por Genzel (SO-2 por Ghez) que, de acuerdo con sus observaciones, describía un recorrido vertiginoso. Su órbita, altamente excéntrica ( $e = 0,88$ ) tiene un periodo de... ¡apenas 16 años! Cuando pasa por el periastró (como hizo en los años 2002 y 2018), esta estrella se encuentra a tan solo 17 horas luz de SgrA\*.

Después de un seguimiento de unas dos décadas, ya se había observado más de una órbita completa y las observaciones de los VLT y de los Keck estaban en un acuerdo magnífico. A partir de estos datos, se determinó la masa del objeto central: 4 millones de masas solares. Mediante observaciones radio, el tamaño de SgrA\* estaba estimado a menos de una unidad astronómica y su movimiento propio era indetectable. Emanando de SgrA\* también se conocían erupciones en rayos X y en el infrarrojo.

Todo sumado, la conclusión que se impuso es que SgrA\* es un agujero negro de 4 millones de masas solares (Ghez et al. 2008, *Ap. J.* 689, 1044; Genzel et al. 2010, *Rev. Mod. Phys.* 82, 3121). Las erupciones observadas encajan muy bien en esta

interpretación ya que deben de ser debidas a variaciones en la acreción sobre el agujero negro (Genzel et al. 2003, *Nature* 425, 6961).

Genzel impulsó el diseño y construcción del instrumento GRAVITY para el VLTI, que vio su primera luz en 2015. Con 20 microsegundos de arco de resolución, este instrumento nos está revelando detalles exquisitos de la región central de la Vía Láctea. El movimiento de la estrella S2 puede ser ahora detectado de noche a noche y, gracias a la gran masa del objeto central, los efectos relativistas, como la precesión del periastró o el desplazamiento hacia el rojo debido a la gravitación, se manifiestan patentemente. Otras observaciones espectaculares son las de las erupciones, que provienen de fuentes que orbitan a tan solo unos 4 radios de Schwarzschild del agujero negro, es decir, justo en las regiones de la órbita estable más interna.

En resumen, el trabajo de Genzel y Ghez ilustra maravillosamente el virtuosismo alcanzado por las observaciones astronómicas de nuestros días. Óptica adaptativa, interferometría, detectores de bajísimo ruido cuántico, las técnicas más innovadoras han sido puestas al servicio de estas imágenes y medidas que nos dejan asombrados por muy astrónomos profesionales que seamos.

Pero, además, detrás de la tecnología hay unas personas absolutamente sobresalientes. Asistimos a una conferencia online de Andrea Ghez organizada por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC) el pasado 29 de octubre y pudimos apreciar desde primera línea su carisma y su dimensión humana. Después de Marie Curie, Maria Goepper Mayer y Donna Strickland, Ghez es la cuarta mujer en recibir este galardón en una disciplina científica, la física, que presenta una de las brechas de género más profundas (los otros 212 laureados hasta ahora han sido hombres).

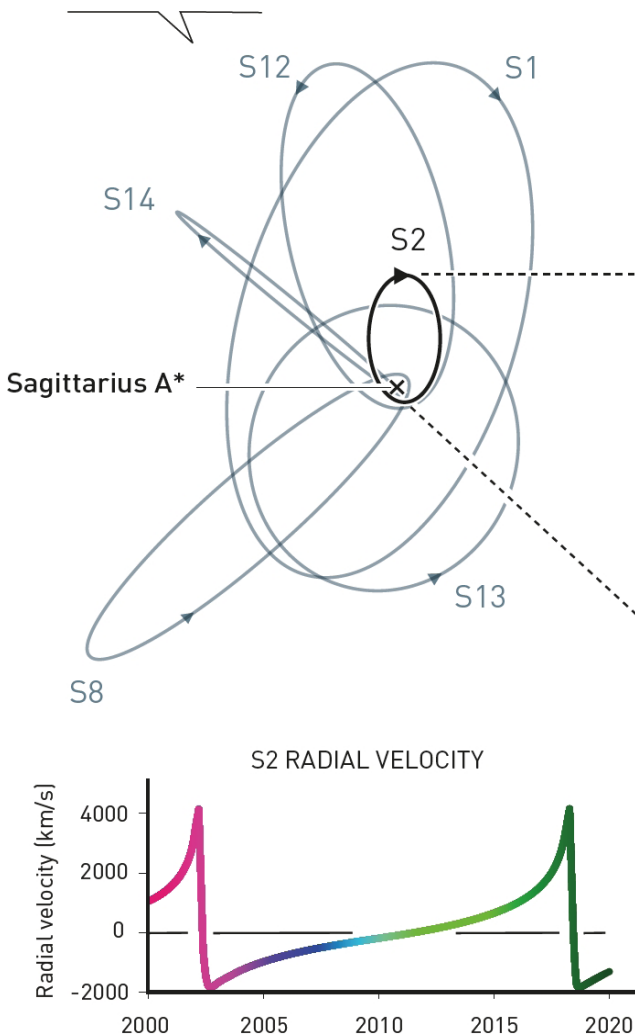
Yo he tenido la suerte de coincidir con Reinhard Genzel en varias tareas de gestión o de asesoramiento científico. Su personalidad es arrolladora, su entusiasmo y su optimismo contagiosos. Es buen conocedor de la astronomía española y académico correspondiente de nuestra Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Hemos tenido la ocasión de escuchar algunas sus conferencias en España (por

# Stars closest to the centre of the Milky Way

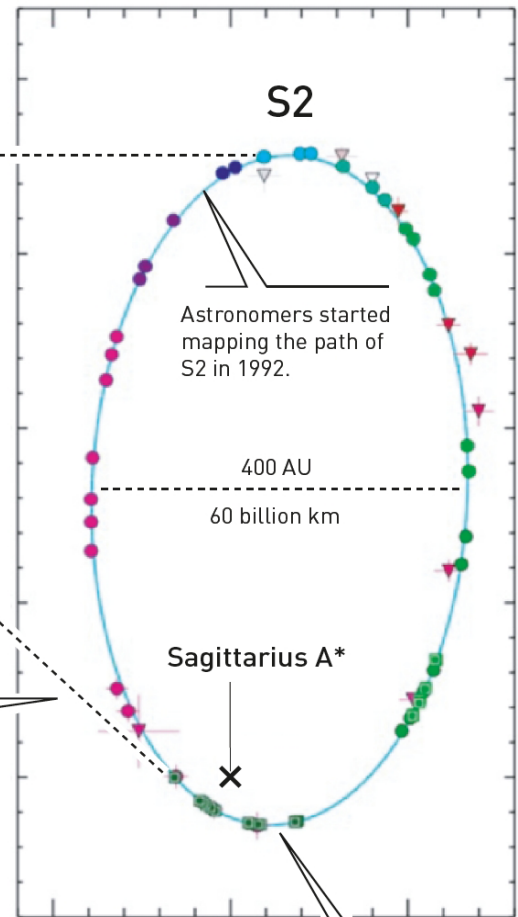
Datos orbitales de las estrellas más cercanas al agujero negro en el centro de la Vía Láctea. Créditos: The Royal Swedish Academy of Sciences.

The stars' orbits are the most convincing evidence yet that a supermassive black hole is hiding in Sagittarius A\*. This black hole is estimated to weigh about 4 million solar masses, squeezed into a region no bigger than our solar system.

Some of the measured orbits of stars close to Sagittarius A\* at the centre of the Milky Way.



Astronomers were able to map an entire orbit of less than 16 years for one of the stars, S2 (or S-02). The closest it came to Sagittarius A\* was about 17 light hours (more than 10,000 million kilometres).



The S2 star's radial velocity increases as it approaches Sagittarius A\* and decreases as it moves away along its elliptical orbit. Radial velocity is the component of the star's velocity that is in our line of sight.

Closest to Sagittarius A\* (in 2002 and 2018), S2 reaches its maximum velocity of 7 000 km/s.

ejemplo, la multitudinaria que impartió en la Fundación BBVA, cuando fue presentado por Santiago García Burillo, del OAN). Sus opiniones han sido determinantes para mantener los observatorios del IRAM (el de Pico Veleta y el de Plateau de Bure) con la instrumentación más puntera del mundo durante décadas.

### GENIO HETERODOXO

La otra mitad del Nobel de Física 2020 se ha otorgado a Penrose “por el descubrimiento de que la formación de agujeros negros es una predicción robusta de la teoría de la relatividad general”.

Para comprender la aportación de Penrose que ha motivado este premio, hay que remontarse a un trabajo de Oppenheimer y Snyder del año 1939 (*Phys. Rev.* 56, 455) en el que se demostraba que el colapso de una nube perfectamente esférica de materia, bajo la métrica de Schwarzschild, conducía a la formación de una singularidad rodeada por un horizonte que hacía de frontera. Los mismísimos Einstein y Wheeler expresaron dudas sobre si este tipo de colapso podría suceder en el mundo real o si la falta de simetría perfecta, la emisión de ondas gravitacionales, la rotación, o algún otro fenómeno podría evitar la formación de esa estructura compacta, un agujero negro.

Mientras el debate se alargaba, el rápido desarrollo de la radioastronomía tras la Segunda Guerra Mundial condujo a la identificación de unas misteriosas fuentes de ondas de radio que, en el óptico, parecían estrellas muy débiles. En 1963, el astrónomo holandés-estadounidense Marteen Schmidt (*Nature* 197, 4872) estimó la distancia y luminosidad de algunas de estas radiofuentes y concluyó que se trataba de galaxias situadas en los confines del universo. El primer cuásar identificado, 3C273, presentaba un desplazamiento hacia el rojo de  $z=0,158$ , lo que indicaba una distancia de 760 Mpc. Su luminosidad era miles de veces mayor que la de la Vía Láctea.

Cuando la naturaleza extragaláctica de los cuásares estaba totalmente aceptada, ya en 1963, Wheeler comentó con Penrose, entonces un joven y brillante matemático (había nacido en Essex en 1931), los cálculos de Oppenheimer y Snyder sobre el colapso gravitatorio. Penrose se puso a analizar el problema tratando de eliminar la hipótesis de la simetría esférica. Para ello desarrolló nuevos mé-

todos matemáticos e introdujo el concepto de ‘superficie atrapada’ (*trapped surface*) para describir al agujero negro por debajo de horizonte. Pronto llegó a la conclusión de que tales superficies atrapadas se formaban también durante el colapso de objetos rotantes (para formar los agujeros negros en rotación que ya había descrito Kerr), y que lo hacían de manera independiente a la geometría del cuerpo que colapsa. Una vez que se forma una superficie atrapada, el colapso ya es imparable. Es decir, Penrose demostró que la formación de un agujero negro era una predicción robusta (e inevitable) de la relatividad general de Einstein (Penrose 1963, *Phys. Rev. Let.* 10, 66; 1965, *Phys. Rev. Let.* 14, 57).

Gracias a su fuerte formación en matemáticas, Penrose pudo dar un grandísimo impulso al estudio de la gravitación. Introdujo numerosas innovaciones para visualizar el espacio-tiempo, como las transformaciones conformes, los twistores y los gráficos que hoy son conocidos como ‘diagramas de Penrose’.

El trabajo de Penrose llevó a aceptar ampliamente que los cuásares deben albergar un agujero negro supermasivo en su núcleo, y que su potente radiación podía estar causada por los fenómenos de acreción sobre el objeto compacto. Lynden-Bell acabaría sugiriendo, en 1969 (*Nature* 223, 5207), que muchas galaxias (si no todas) deben poseer un agujero negro central.

Junto a Hawking, Penrose demostró que estos resultados sobre agujeros negros pueden extenderse al estudio de singularidades cosmológicas, como la del big bang. De hecho, los trabajos con Hawking aportaron mucha más información sobre el comportamiento de tan fascinantes objetos (p. ej.: Hawking & Penrose 1970, *Proc. of the Royal Society*, 314, 1519). Y creo que es legítimo preguntarse si no habría sido más adecuado haber concedido este Nobel hace unos diez o veinte años, cuando la importancia de estas aportaciones ya estaba completamente reconocida y, además, Hawking aún vivía. Si hubiese sido así, Hawking habría podido compartir justamente el premio (los Nobel no se otorgan a título póstumo).

Penrose está teniendo una carrera muy larga y fructífera. En sus publicaciones no se ha limitado a artículos científicos, además ha escrito unos libros muy

influyentes que han abordado grandes cuestiones de la filosofía de la ciencia. Muchos de nosotros recordaremos “La nueva mente del emperador” (1989) en el que Penrose argumenta que la mecánica cuántica determina el funcionamiento del cerebro y que la conciencia humana no solo está compuesta de algoritmos y, por lo tanto, nunca podrá ser simulada por una máquina.

En 2004 publicó una obra monumental: “El camino a la realidad”, un volumen de 1100 páginas que trata de abarcar todos los aspectos del modelo estándar de la física y que aporta su visión personal sobre la unificación de la relatividad general y la mecánica cuántica. No es un libro de lectura fácil.

Más recientemente, Penrose, junto con el físico armenio Vahe Gurzadyan, ha desarrollado la cosmología cíclica conforme (CCC), una teoría heterodoxa que niega la inflación y que pretende demostrar que el universo evoluciona mediante ciclos infinitos. En apoyo de esta teoría, los dos físicos argumentan que, en los mapas de la radiación cósmica de fondo (por ejemplo, los obtenidos por el satélite Planck), pueden reconocerse indicios del universo que precedió al big bang del universo actual. La teoría ha sido recogida en el libro del 2010 “Ciclos del tiempo. Una extraordinaria nueva visión del universo”.

En un plano más personal, me gustaría comentar que siempre me ha fascinado la descomunal figura de Penrose, también su dimensión humanista. Sus reflexiones sobre cuestiones filosóficas que a todos nos interesan rezuman honestidad. Se pregunta el físico, por ejemplo, si el universo puede tener un propósito, o si es un sistema que se limita a funcionar como un gran ordenador en el que el ser humano ha aparecido por algún tipo de casualidad. Penrose intuye que debe de haber algo más profundo en todo esto, pero reconoce que tan solo es una intuición (él se declara ateo).

### **EDAD DE ORO**

El Nobel de este año reconoce la importancia de los agujeros negros en la descripción de la gravedad. Su estudio y sus observaciones han abierto una era completamente nueva tanto en la astronomía como en la física. Los observatorios de ondas gravitacionales no dejan de sorprendernos cada día con

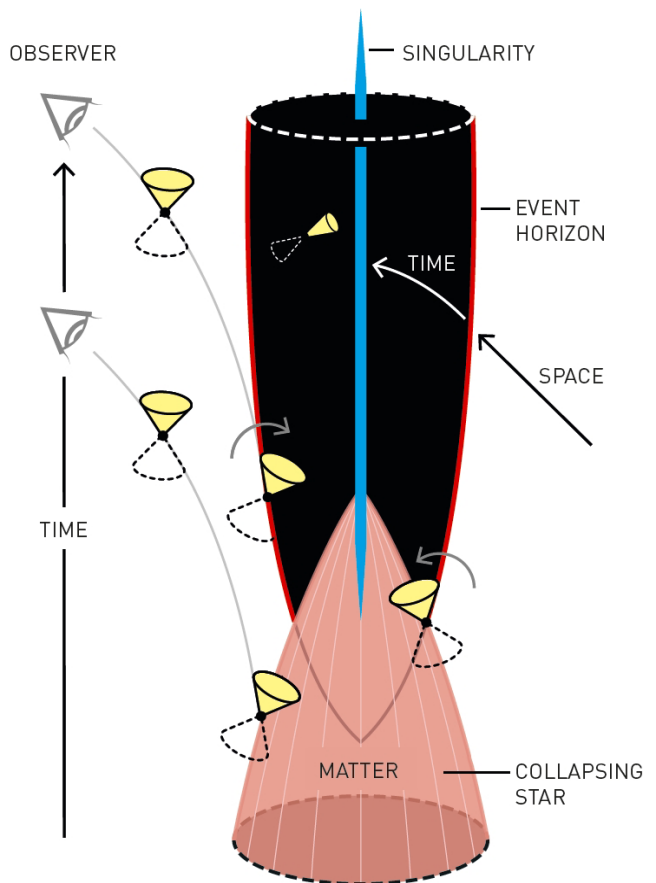
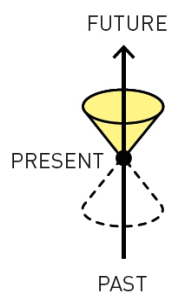
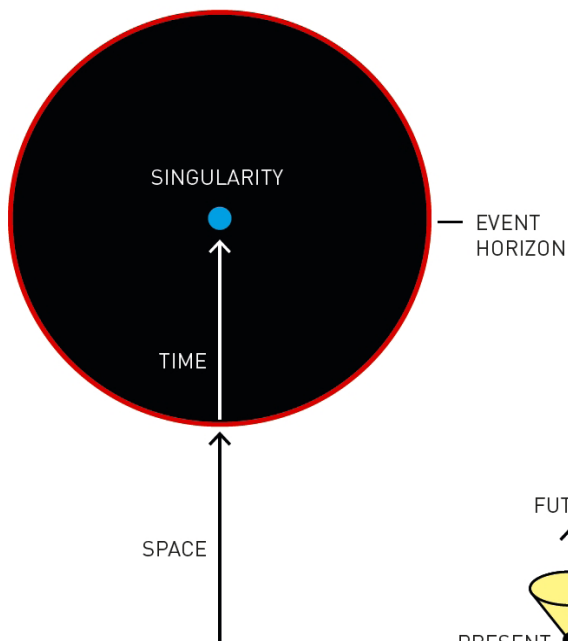
descubrimientos que permiten estudiar la población de agujeros de masa estelar y sus interacciones. El EHT continúa sus campañas de observación y es de esperar que desvelará en breve nuevos secretos de los objetos supermasivos, incluyendo SgrA\*.

Además, junto con los agujeros negros, hay otros resultados astrofísicos (o muy conectados con la astrofísica) que han sido merecedores del Nobel en la última década: la expansión acelerada del universo (2011), el bosón de Higgs (2013), las oscilaciones de los neutrinos (2015), las ondas gravitacionales (2017), el descubrimiento de los exoplanetas (2019) y la cosmología física (2019). Estos resultados, y su reconocimiento por una amplia comunidad científica, en el marco de la física, son una muestra de que nuestra ciencia se hace cada vez más interdisciplinar y más dinámica. Otros temas, como la astronomía multimensajero, los fenómenos transitorios y la exobiología, están experimentando ahora un auge impresionante. Es una suerte vivir en esta edad de oro de la astronomía, sobre todo para nosotros, astrónomos y astrónomas, que tenemos el privilegio de vivirla desde primera fila.

Conos de luz en las cercanías de un agujero negro, en el horizonte de sucesos y en su interior. Una vez cruzada la frontera, el tiempo reemplaza el espacio y todo apunta hacia la singularidad en su centro.  
 Créditos: Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

## Cross section of a black hole

When a massive star collapses under its own gravity, it forms a black hole that is so heavy that it captures everything that passes its event horizon. Not even light can escape. At the event horizon, time replaces space and points only forward. The flow of time carries everything towards a singularity furthest inside the black hole, where density is infinite and time ends.



The light cone shows the paths of the light rays forward and backward in time. When matter collapses and forms a black hole, the light cones that cross the black hole's event horizon will turn inward, toward the singularity. An outside observer will never really see the light rays reach the event horizon, they just nudge it. No one can see further in.