

Agujeros negros y el secreto más oscuro de la Vía Láctea

Tres galardonados comparten el Premio Nobel de Física de este año por sus descubrimientos sobre uno de los fenómenos más exóticos del universo, el agujero negro. Roger Penrose demostró que los agujeros negros son una consecuencia directa de la teoría general de la relatividad. Reinhard Genzel y Andrea Ghez descubrieron que un objeto invisible y extremadamente pesado gobierna las órbitas de las estrellas en el centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Un agujero negro supermasivo es la única explicación admitida actualmente.

Roger Penrose desarrolló ingeniosos métodos matemáticos para explorar la teoría general de la relatividad de Albert Einstein. Demostró que la teoría conduce a la formación de agujeros negros, monstruos del espacio-tiempo que capturan todo lo que entra en ellos. Nada, ni siquiera la luz, puede escapar.

Reinhard Genzel y Andrea Ghez lideran sendos grupos de astrónomos que se han centrado en una región en el centro de la Vía Láctea desde principios de la década de 1990. Con gran precisión han cartografiado las órbitas de las estrellas más brillantes cercanas al centro. Ambos grupos encontraron algo, invisible y pesado, que obliga a girar a estas estrellas. Esta masa invisible



tiene alrededor de cuatro millones de masas solares comprimidas en una región no más grande que nuestro sistema solar. ¿Qué es lo que hace que las estrellas en el corazón de la Vía Láctea se muevan a velocidades tan asombrosas? Según la teoría actual de la gravedad solo hay un candidato: un agujero negro supermasivo.

Un gran avance más allá de Einstein

Ni siquiera Albert Einstein, el padre de la relatividad general, pensó que los agujeros negros pudieran existir realmente. Sin embargo, diez años después de la muerte de Einstein, el teórico británico Roger Penrose demostró que se pueden formar agujeros negros y describió sus propiedades. Los agujeros negros esconden en su interior una singularidad, la frontera en la que todas las leyes conocidas de la naturaleza dejan de funcionar. Para demostrar que la formación de agujeros negros es un proceso estable, Penrose necesitaba expandir los métodos utilizados para estudiar la teoría de la relatividad, abordando los problemas con nuevos conceptos matemáticos. El innovador artículo de Penrose se publicó en enero de 1965 y todavía hoy se considera la contribución más importante a la teoría general de la relatividad desde Einstein.

La gravedad mantiene el universo unido

Los agujeros negros son quizás la consecuencia más extraña de la teoría general de la relatividad. Cuando Albert Einstein presentó su teoría en noviembre de 1915, removió todos los conceptos anteriores de espacio y tiempo. La teoría proporcionó una base completamente nueva para comprender la gravedad, que da forma al universo a gran escala. Desde entonces esta teoría ha proporcionado la base para todos los estudios del universo y también tiene un uso práctico en una de nuestras herramientas de navegación más comunes, el GPS.

La teoría de Einstein describe cómo todo en el universo está sujeto a la gravitación. La gravedad nos retiene en la Tierra, gobierna las órbitas de los planetas alrededor del Sol y la órbita del Sol alrededor del centro de la Vía Láctea. Conduce al nacimiento de estrellas a partir de nubes interestelares y, finalmente, a su muerte tras un colapso gravitacional. La gravedad da forma al espacio e influye en el paso del tiempo. Una masa pesada deforma el espacio y ralentiza el tiempo; una masa extremadamente pesada puede incluso cortar y encapsular un pedazo de espacio, formando un agujero negro.

La primera descripción teórica de lo que ahora llamamos un agujero negro se produjo apenas unas semanas después de la publicación de la teoría general de la relatividad. A pesar de las complicadas ecuaciones matemáticas de la teoría, el astrofísico alemán Karl Schwarzschild propuso a Einstein una solución que describía cómo las masas pesadas pueden deformar el espacio y el tiempo.

Estudios posteriores mostraron que una vez formado un agujero negro, queda rodeado por un horizonte de eventos que, como un velo, oculta la masa situada en su centro. El agujero negro permanece oculto para siempre dentro de su horizonte de eventos. Cuanto mayor es la masa, mayor es el agujero negro y su horizonte. Para una masa equivalente a la del Sol, el horizonte de sucesos tiene un diámetro de casi tres kilómetros y, para una masa como la de la Tierra, su diámetro es de solo nueve milímetros.

Una solución más allá de la perfección

El concepto de "*agujero negro*" ha encontrado un nuevo significado en muchas formas de expresión cultural pero, para los físicos, los agujeros negros son el final natural de la evolución de las estrellas gigantes. El primer cálculo del dramático colapso de una estrella masiva fue realizado a fines de la década de 1930 por el físico Robert Oppenheimer, quien luego dirigió el Proyecto Manhattan para la construcción de la primera bomba atómica. Cuando las estrellas gigantes, muchas veces más pesadas que el Sol, se quedan sin combustible, primero explotan como supernovas y luego colapsan formando objetos extraordinariamente densos, tan pesados que la gravedad arrastra todo, incluso la luz.

La idea de las "*estrellas oscuras*" se consideró ya a finales del siglo XVIII, en las obras del filósofo y matemático británico John Michell y del renombrado científico francés Pierre Simon de Laplace. Ambos habían razonado que los cuerpos celestes podrían volverse tan densos que serían invisibles, ni siquiera la luz sería lo suficientemente rápida como para escapar de su gravedad. Poco más de un siglo después, cuando Albert Einstein publicó su teoría general de la relatividad, algunas de las soluciones a las ecuaciones de la teoría describían esas estrellas oscuras. Hasta la década de 1960 estas soluciones se consideraban especulaciones puramente teóricas, que describían situaciones ideales, en las que las estrellas y sus agujeros negros eran perfectamente redondos y simétricos. Pero nada en el universo es perfecto, y Roger Penrose fue el primero en encontrar con éxito una solución real para la materia que colapsa.

El misterio de los cuásares

La cuestión de la existencia de agujeros negros resurgió en 1963, con el descubrimiento de los cuásares, los objetos más brillantes del universo. Durante casi una década, los astrónomos habían estado desconcertados con misteriosas fuentes emisoras de radiofrecuencias, como 3C273 en la constelación de Virgo. 3C273 está tan lejos que sus emisiones tardan en llegar a la Tierra más de mil millones de años.

Una fuente situada tan lejos debe de tener un brillo equivalente al de varios cientos de galaxias. Se le dio el nombre de "cuásar". Los astrónomos pronto encontraron cuásares tan distantes que habían emitido su radiación en los primeros momentos del universo. ¿De dónde viene esta increíble radiación? Solo hay una forma de obtener esa cantidad de energía dentro del volumen limitado de un cuásar: de la materia que cae en un agujero negro masivo.

Las "superficies atrapadas" resolvieron el enigma

Si los agujeros negros podrían formarse en condiciones reales fue una cuestión que intrigó a Roger Penrose. La respuesta, como el mismo comentó, surgió en el otoño de 1964 durante una caminata con un colega en Londres, donde Penrose era profesor de matemáticas en el Birkbeck College. Cuando dejaron de hablar para cruzar una calle, se le ocurrió una idea. Después, esa tarde, pensó en ello. Esta idea, a la que llamó "superficies atrapadas", era la clave que había estado buscando inconscientemente, una herramienta matemática crucial necesaria para describir un agujero negro.

Una superficie atrapada obliga a todos los rayos a apuntar hacia un centro, independientemente de si la superficie se curva hacia afuera o hacia adentro. Utilizando superficies atrapadas Penrose pudo demostrar que un agujero negro siempre esconde una singularidad, un límite donde el tiempo y el espacio desaparecen. Su densidad es infinita y, hasta el momento, no existe una teoría sobre cómo abordar este extrañísimo fenómeno de la física.

Las superficies atrapadas se convirtieron en un concepto central en la demostración de Penrose del teorema de la singularidad. Los métodos topológicos introducidos no se pueden evaluar en el estudio de nuestro universo curvo.

Los agujeros negros gobiernan el camino de las estrellas

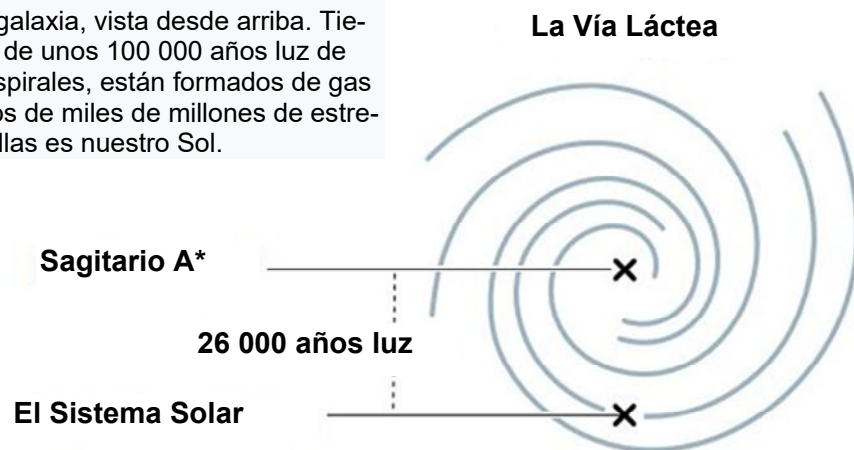
Aunque no podemos ver el agujero negro es posible establecer sus propiedades observando cómo su colosal gravedad dirige los movimientos de las estrellas circundantes.

Reinhard Genzel y Andrea Ghez lideran distintos grupos de investigación que exploran el centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Con la forma de un disco grueso de unos 100 000 años luz de diámetro, está formado por gas y polvo y unos pocos de cientos de miles de millones de estrellas; una de estas estrellas es nuestro Sol (figura 3). Desde nuestro punto de vista en la Tierra, enormes nubes de gas y polvo interestelar oscurecen la mayor parte de la luz visible que proviene del centro de la galaxia. Los telescopios infrarrojos y los radiotelescopios fueron los primeros que permitieron a los astrónomos ver a través del disco de la galaxia y visualizar las estrellas del centro.

Utilizando las órbitas de las estrellas como guías, Genzel y Ghez han llegado a la explicación más convincente hasta el momento, hay un objeto supermasivo invisible escondido allí. Un agujero negro es la única explicación posible.

Figura 3.

La Vía Láctea, nuestra galaxia, vista desde arriba. Tiene la forma de un disco de unos 100 000 años luz de diámetro. Sus brazos espirales, están formados de gas y polvo y algunos cientos de miles de millones de estrellas. Una de estas estrellas es nuestro Sol.



Centrarse en el centro

Durante más de cincuenta años los físicos han sospechado que puede haber un agujero negro en el centro de la Vía Láctea. Desde que se descubrieron los cuásares a principios de la década de 1960, los físicos razonaron que podrían encontrarse agujeros negros supermasivos en el centro de la mayoría de las grandes galaxias, incluida la Vía Láctea. Sin embargo, actualmente, nadie puede explicar cómo se formaron las galaxias y sus agujeros negros cuya masa oscila entre unos pocos millones y muchos miles de millones de masas solares.

Hace cien años el astrónomo estadounidense Harlow Shapley fue el primero en identificar el centro de la Vía Láctea en la dirección de la constelación de Sagitario. Con observaciones posteriores detectaron allí una intensa fuente de ondas de radio que recibió el nombre de Sagitario A *. Desde finales de la década de los sesenta, quedó claro que Sagitario A * ocupa el centro de la Vía Láctea, alrededor del cual orbitan todas las estrellas de la galaxia.

En la década de 1990 los telescopios más grandes y un mejor equipo permitieron estudios más sistemáticos de Sagitario A *. Reinhard Genzel y Andrea Ghez comenzaron proyectos para intentar ver a través de las nubes de polvo el corazón de la Vía Láctea. Sus grupos de investigación desarrollaron y perfeccionaron técnicas, construyendo instrumentos y comprometiéndose con la investigación a largo plazo.

Solo los telescopios más grandes del mundo serán suficientes para observar estrellas distantes; cuanto más grande, mejor, es absolutamente cierto en astronomía. El astrónomo alemán Reinhard Genzel y su grupo utilizaron inicialmente NTT, el telescopio de nueva tecnología en la montaña La Silla en Chile. Finalmente trasladaron sus observaciones a las instalaciones del Very Large Telescope, VLT, en la montaña Paranal (también en Chile). Con cuatro telescopios gigantes del doble del tamaño de NTT, el VLT tiene los espejos más grandes del mundo, cada uno con un diámetro de más de 8 metros.

En los EE. UU., Andrea Ghez y su equipo de investigación utilizan el Observatorio Keck, ubicado en la montaña hawaiana de Mauna Kea. Sus espejos tienen casi 10 metros de diámetro y actualmente se encuentran entre los más grandes del mundo. Cada espejo es como un panel que consta de 36 segmentos hexagonales que se pueden controlar por separado para enfocar mejor la luz de las estrellas.

Las estrellas nos muestran el camino

Por grandes que sean los telescopios siempre hay un límite en el detalle que pueden resolver porque vivimos sumergidos en una atmósfera de casi 100 kilómetros de espesor. Grandes burbujas de aire, más calientes o más frías que su entorno, actúan como lentes y refractan la luz en su camino hacia el espejo del telescopio provocando distorsiones. Es por eso que observamos que las estrellas parpadean y sus imágenes aparecen borrosas.

La llegada de la óptica adaptativa fue crucial para mejorar las observaciones. Los telescopios ahora están equipados con un espejo extra que compensa la turbulencia del aire y corrige la imagen distorsionada.

Durante casi treinta años Reinhard Genzel y Andrea Ghez han observado estrellas en el lejano revoltijo estelar del centro de nuestra galaxia. Desarrollando y refinando continuamente la tecnología con sensores de luz digital más sensibles y mejores ópticas adaptativas, la resolución de la imagen ha mejorado más de mil veces. Ahora pueden determinar con mayor precisión las posiciones de las estrellas.

Se rastrean unas treinta de las estrellas de las más brillantes. Las estrellas se mueven rápidamente en un radio de un mes luz desde el centro, dentro del cual realizan una danza agitada como la de un enjambre de abejas. Las estrellas que se encuentran fuera de esta zona, en cambio, siguen sus órbitas elípticas de forma más ordenada (figura 4).

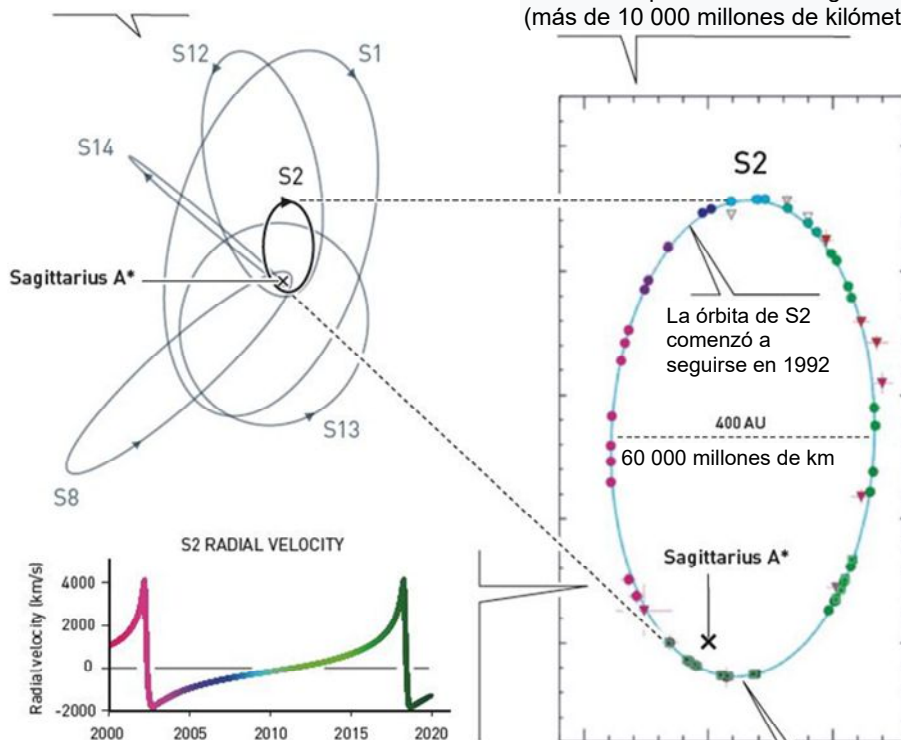
Una estrella, llamada S2 o S-O2, completa una órbita alrededor del centro de la galaxia en menos de 16 años. Este es un tiempo extremadamente corto, por lo que los astrónomos pudieron determinar su órbita. Podemos comparar esto con el Sol, que tarda más de 200 millones de años en completar una vuelta alrededor del centro de la Vía Láctea; los dinosaurios caminaban por la Tierra cuando comenzamos nuestra vuelta actual.

Las estrellas más cercanas al centro de la Vía Láctea

Las órbitas de las estrellas son la evidencia más convincente de que un agujero negro supermasivo se esconde en Sagitario A*. Se estima que este agujero negro tiene alrededor de 4 millones de masas solares, comprimidas en una región no más grande que nuestro sistema solar.

Algunas de las órbitas de estrellas cercanas a Sagitario A* en el centro de la Vía Láctea.

Los astrónomos pudieron determinar una órbita completa, de menos de 16 años, para una de las estrellas, S2 (o S-O2). Lo más cerca que estuvo de Sagitario A* fue a unas 17 horas luz (más de 10 000 millones de kilómetros).



La velocidad radial de la estrella S2 aumenta a medida que se acerca a Sagitario A* y disminuye a medida que se aleja a lo largo de su órbita elíptica. La velocidad radial es el componente de la velocidad de la estrella que está en nuestra línea de visión.

En el punto más cercano a Sagitario A* (en 2002 y 2018), S2 alcanza su velocidad máxima, unos 7000 km/s.

Figura4. Las órbitas de las estrellas revelaron que algo invisible y pesado gobernaba sus caminos en el corazón de la Vía Láctea

La teoría y las observaciones concuerdan

El acuerdo entre las mediciones de los dos equipos fue excelente, lo que llevó a la conclusión de que el agujero negro en el centro de nuestra galaxia debería ser equivalente a alrededor de 4 millones de masas solares, empaquetadas en una región del tamaño de nuestro sistema solar.

Es posible que pronto veamos directamente a Sagitario A*. Es el siguiente en la lista porque, hace poco más de un año, la red de astronomía Event Horizon Telescope logró obtener imágenes de los alrededores más cercanos de un agujero negro supermasivo. En lo más profundo de la galaxia conocida como Messier 87 (M87), en Virgo, a 55 millones de años luz de nosotros, hay un agujero negro rodeado por un anillo incandescente.

El núcleo de M87 es gigantesco, más de mil veces más pesado que Sagitario A*. Los agujeros negros en colisión que causaron las ondas gravitacionales recientemente descubiertas fueron considerablemente más ligeros. Al igual que los agujeros negros, las ondas gravitacionales existían solo como cálculos de la teoría general de la relatividad de Einstein, antes de ser detectadas por primera vez en el otoño de 2014 por el detector LIGO en Estados Unidos (Premio Nobel de Física, 2017).

Lo que no sabemos

Roger Penrose demostró que los agujeros negros son una consecuencia directa de la teoría general de la relatividad pero en las singularidades, donde la gravedad es infinitamente fuerte, esta teoría deja de tener aplicación. En el campo de la física teórica se está llevando a cabo un intenso trabajo con el fin de elaborar una nueva teoría de la gravedad cuántica. Se trata de conciliar los dos pilares de la física, la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica, ya que ambos han de aplicarse en el interior de los agujeros negros.

Al mismo tiempo las observaciones nos acercan a los agujeros negros. El trabajo pionero de Reinhard Genzel y Andrea Ghez ha abierto el camino a nuevas pruebas, más precisas, de la teoría general de la relatividad y sus predicciones más exóticas. Lo más probable es que estas mediciones también puedan proporcionar pistas para nuevos conocimientos teóricos. El universo tiene muchos secretos y sorpresas por descubrir.

OTRAS LECTURAS

En el sitio web de la Real Academia Sueca de Ciencias, www.kva.se, y en www.nobelprize.org, se puede obtener información adicional sobre los premios de este año, incluidos vídeos de las conferencias de prensa, las Nobel Lectures y más. La información sobre exposiciones y actividades relacionadas con los Premios Nobel y el Premio de Ciencias Económicas está disponible en www.nobelprizemuseum.se

La Real Academia de Ciencias de Suecia ha decidido otorgar el Premio Nobel de Física 2020

Una mitad a	y la otra mitad compartida para	
ROGER PENROSE Born 1931 in Colchester, UK. Ph.D. 1957 at University of Cambridge, UK. Professor at University of Oxford, UK	REINHARD GENZEL Born 1952 in Bad Homburg vor der Höhe, Germany. Ph.D. 1978 at University of Bonn, Germany. Director at Max Planck Institute for Extra-terrestrial Physics, Garching, Germany and Professor at University of California, Berkeley, USA	ANDREA GHEZ Born 1965 in City of New York, USA. Ph.D. 1992 at California Institute of Technology, Pasadena, USA. Professor at University of California, Los Angeles, USA.
"Por el descubrimiento de que la formación de agujeros negros es una predicción de la teoría general de la relatividad"	"Por el descubrimiento de un objeto compacto supermasivo en el centro de nuestra galaxia"	