



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

erro Paranal. 2.635 metros sobre el nivel del mar. La sala está en penumbras. En los monitores titilan números y curvas. Las personas frente a los monitores intercambian información en forma rutinaria. Esporádicamente se susurran números o siglas. Mientras tanto, tras los cristales de la ventana de la "cabina", cuatro telescopios reflectores gigantes exploran el cielo negro azabache sobre los Andes chilenos y recogen fotones de los rincones más recónditos del universo. Hace horas, uno de los telescopios transmite imágenes desde el corazón de la Vía Láctea al monitor de observación. Bien pasada la medianoche, un grito de sorpresa arranca a los astrónomos de su

¿Qué se esconde tras un fenómeno cósmico tan exótico? Ya a fines del siglo XVIII, el matemático francés Pierre Simon de Laplace suponía que estos objetos realmente existían. Imaginó que una esfera material de masa constante, se contraía hasta que en su superficie la aceleración gravitacional aumentaba tanto, que la "velocidad de fuga" (v_F), que en la Tierra es de 11,2 kilómetros por segundo, alcanzara el valor de la velocidad de la luz. En este caso, ni siquiera los fotones logran escapar de las "garras" gravitatorias de tales cuerpos, volviéndose invisible para el observador. De esta manera nacen los agujeros negros (Fig. A).

Monstruos de masa en el universo

Los científicos echan luz sobre los agujeros negros

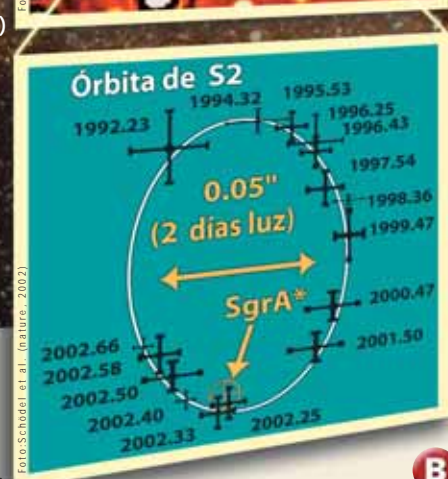
rutina. "¿Qué hace esa estrella ahí?" Un punto de luz había aparecido de la nada, para volver a desaparecer poco después, sin dejar rastro. Pero ¿qué significa esto? Pronto lo supieron: los científicos habían descubierto un monstruo de masa en plena comida.

¿Es éste el comienzo de una película de ciencia ficción? No, la escena es real y ocurrió el 9 de mayo de 2003 en la sala de control del *Very Large Telescope* (VLT) - literalmente en español: "telescopio muy grande" - del Observatorio Astronómico Europeo del Hemisferio Sur. Los protagonistas: un equipo internacional de astrónomos que trabajan junto con Reinhard Genzel del Instituto Max Planck de Física Extraterrestre de Garching y... un agujero negro.

Karl Schwarzschild fue el primero en calcular el radio de una esfera que cumple el criterio mencionado, es decir, en cuya superficie, la velocidad de fuga es igual a la velocidad de la luz ($c = 300.000 \text{ km/s}$). Para la Tierra, por ejemplo, el llamado **Radio de Schwarzschild** es de casi un centímetro. En un principio, las reflexiones de Laplace y los cálculos de Schwarzschild nunca pasaron del orden teórico. Recién en la década de 1930, cuando los científicos dieron los primeros

→

A



▲ Zoom: La Vía Láctea surca el cielo como una franja luminosa. En dirección hacia la región más clara en este mar de estrellas, gases y polvo, se encuentra el centro de nuestra galaxia (a). Los astrónomos observan el corazón de la Vía Láctea con una cámara infrarroja en el *Very Large Telescope*. Las flechas amarillas en el centro marcan la posición de la radiofuente SgrA* (b). Debajo, vemos la zona que rodea a SgrA* con una resolución de unos pocos días luz (c). La órbita que describe la estrella S2 (d) puede describirse mediante una elipse con un coeficiente de excentricidad de 0,87, en cuyo centro se encuentra el agujero negro supermasivo.

→ pasos para comprender la física de las estrellas, los agujeros negros lentamente comenzaron a llamar la atención.

El astrónomo Fritz Zwicky acuñó el término **estrella de neutrones**. A este estado llegan las estrellas que poseen entre ocho y 30 veces la masa del sol, al finalizar su existencia. A temperaturas de mil millones de grados, el reactor central de fusión produce elementos cada vez más complejos, como oxígeno y silicio. Con el hierro el proceso se detiene, porque sus átomos ya no pueden quemarse. Al apagarse el horno estelar, la esfera de gas se desequilibra, puesto que ya no logra mantener la presión hidrostática y el núcleo colapsa por efecto de su propio peso; sin embargo, el manto exterior se dispara al espacio y estalla para brillar intensamente como **supernova**.

Con una presión de un millón de toneladas por centímetro cúbico en el interior del núcleo, el juego de las fuerzas atómicas se desordena, ya que las partículas superan la **barrera potencial**. Los electrones son presionados hacia el interior de los protones y se originan neutrones. Una cuchara de té de esta materia en la Tierra pesaría aproximadamente 10.000 millones de toneladas. Dado que el **momento angular** (producto del momento de inercia y de la velocidad angular) no cesa, la rotación más bien moderada de la estrella antes "sana", se acelera en la misma medida en que su núcleo colapsado incrementa su densidad y se contrae. Debido a las enormes fuerzas centrífugas se produce una constante fuga de partículas de la superficie. Éstas se aceleran

en el fuerte campo magnético bipolar y emiten **radiación sincrotrónica**. La emisión se produce en dos conos que poseen un ángulo de apertura de entre diez y quince grados respectivamente. Este "faro cósmico" se detecta en la Tierra, porque la estrella titila a intervalos de milésimas de segundo. Cuando ocurre este fenómeno, los astrónomos observan un **púlsar**.

La esfera de una estrella de neutrones posee un diámetro de apenas 10 a 20 kilómetros y, como máximo, 1,4 veces la masa solar. Ninguna de las estrellas de neutrones que se conocen hasta ahora supera este **Límite de Chandrasekhar**. Pero ¿qué ocurre cuando mueren estrellas más pesadas, con más de 30 masas solares? En estos casos, el colapso total ya no puede detenerse. La esfera quemada se contrae totalmente, hasta que la exótica formación alcanza un radio dos veces mayor al de Schwarzschild. En este proceso se pierden todas las estructuras. Sólo dos parámetros caracterizan a un agujero negro como éste: su masa y el momento angular. La tercera magnitud que exige la teoría es la carga eléctrica, que puede ser obviada, ya que en el espacio la materia es neutra no existiendo, por ende, agujeros negros con carga eléctrica.

UNA BATIDORA QUE AMASA EL ESPACIO-TIEMPO

Según la Teoría de la Relatividad General de Einstein, las masas curvan o distorsionan el espacio, del mismo modo que una persona durmiendo deforma un colchón blando. Los campos gravitacionales extremadamente fuertes de un agujero negro deberían curvar a tal punto el espacio, que se cerraría y encapsularía al mismo tiempo. El propio Karl Schwarzschild describió la métrica del espacio que rodea un agujero negro en reposo - que en la naturaleza no debería existir por la conservación del momento angular. Si bien parte de este impulso se irradia en forma de **ondas gravitacionales** (véase el recuadro), el agujero negro debería seguir rotando. Recién a fines de la década de 1960, los teóricos lograron traducir en fórmulas la métrica de un objeto como el descrito.

De los cálculos se desprende, que un agujero negro en rotación no sólo curva el espacio, sino que lo arrastra como una batidora de cocina a la masa de harina. Además, atrae toda materia que se le acerque demasiado, e incluso la traga. Dado que los agujeros negros son invisibles, estas características son la única oportunidad que se le presenta al observador. Pero ¿qué efectos deben buscar los astrónomos?

La respuesta a esta pregunta se obtiene gracias a la geometría de semejante "trampa gravitacional". Un agujero negro en rotación encierra una esfera con el Radio de Schwarzschild. En el centro se encuentra una **singularidad** que no puede describirse con nuestras leyes físicas. La superficie de la esfera se denomina "horizonte de sucesos". Lo que ocurre más allá de él nos queda vedado, al igual que la materia que desaparece de nuestro mundo tras este horizonte de sucesos. Esta cubierta está rodeada por un elipsoide, cuya superficie conforma el "horizonte exterior". Detrás de él se inicia la ergosfera. Si las partículas penetran en ella a alta velocidad, efectivamente habrá escapatoria, e incluso absorberán energía. Si, en cambio, las partículas más lentas pasan este límite mágico, terminarán en órbitas espiraladas e irán describiendo círculos cada vez más pequeños dentro de la ergosfera. A medida que la energía gravitacional aumenta, el agujero negro pierde momento angular. Si desde el exterior cayera materia sobre un agujero negro, este mecanismo la recalentará mucho, alcanzando su mayor temperatura en la última órbita estable para, de inmediato, desaparecer tras el horizonte de sucesos. Entonces ¿cómo es posible observar agujeros negros?

- Al tragar materia, los agujeros negros producen energía de radiación, cuya existencia puede demostrarse con telescopios o satélites. Entretanto, los astrónomos han descubierto una serie de fuentes de radiación sospechosas en nuestra **galaxia**. Aparentemente, uno de estos agujeros negros absorbe materia de una estrella que lo acompaña, acumulándose primero en un **disco de acrecimiento** para luego desaparecer de nuestro mundo de la manera descrita.

- Los agujeros negros funcionan como centros de gravedad invisibles. Si el Sol, por ejemplo, se transformase en un agujero negro — lo que nunca sucederá, porque su masa es demasiado escasa —, los planetas continuarían circulando en sus órbitas. Si aplicamos las **Leyes de Kepler** y la **Ley de Gravedad de Newton**, a partir de la órbita de un planeta podremos calcular la masa del cuerpo central. Ahora, prácticamente la mitad de todas las estrellas de la galaxia pertenecen a sistemas binarios, en donde dos soles se trasladan sobre órbitas vinculadas por la gravedad. Basándose en este hecho, los astrónomos pueden deducir la masa de las estrellas. Sin embargo, en algunos sistemas parece haber un socio de masa invisible extraordinariamente grande, que muy probablemente sea un agujero negro.

En la búsqueda de agujeros negros, hace unas décadas también comenzó a cobrar interés el corazón de la galaxia, situado a unos 26.000 años luz (**Fig. B**). El centro de la Vía Láctea es el "corazón galáctico" que más cerca tenemos. Su proximidad nos permite realizar las afirmaciones más precisas sobre la posible existencia de un agujero negro. Efectivamente, los astrónomos encontraron un cúmulo estelar muy denso con una radiofuente central compacta y muy luminosa. La denominación de la constelación de Sagitario donde, visto desde la Tierra, se encuentra el centro del sistema de la galaxia, es "Estrella Sagitario A" (SgrA*). Su diámetro de 300 millones de kilómetros es llamativamente pequeño y, por lo tanto, menor que el diámetro de la órbita terrestre alrededor del sol. Para develar el secreto, el grupo de investigadores que trabajan con Reinhard Genzel colocó a SgrA* bajo la mira de telescopios como el *Very Large Telescope*.

Comparando varias nítidas fotografías tomadas en diferentes momentos con nuevas tecnologías de observación, los investigadores determinaron el movimiento propio de las estrellas y sus velocidades radiales aplicando el

Efecto Doppler. El primer parámetro establece el movimiento angular en el cielo, y el segundo, la velocidad a lo largo de la línea visual de la Tierra. Del análisis de ambos componentes se obtuvo el verdadero movimiento de las estrellas en el espacio: rodeaban una masa invisible, que debía estar concentrada en una región menor a dos semanas luz y que debía poseer una masa aproximadamente tres millones de veces mayor a la del Sol. ¿Qué se ocultaba detrás? ¿Un oscuro montón de soles de luz tenue extremadamente compacto? ¿Una acumulación de estrellas de neutrones? ¿Objetos subestelares como rocas? ¿Materia de hipotéticas partículas elementales pesadas? ¿Un agujero negro?

MIRADA PROFUNDA AL CORAZÓN DE LA VÍA LÁCTEA

Para verificar las diversas explicaciones posibles, fue necesario realizar observaciones aún más detalladas. El gran avance se logró en la primavera europea de 2002 con una cámara desarrollada en conjunto por los Institutos Max Planck de Astronomía de Heidelberg, y de Física Extraterrestre de Garching, sumado al **sistema óptico adaptable** diseñado en →

LAS COLISIONES PRODUCEN ONDAS

Estas ondas distorsionan el espacio como una piedra que cae al agua, propagándose en todas direcciones a la velocidad de la luz. En su Teoría de la Relatividad General, Albert Einstein describe un fenómeno, cuya existencia creyó jamás podría probarse: las ondas gravitacionales. Casi nueve décadas después, la física gravitacional se está transformando en una ciencia experimental. Ya en 1974, Joseph Taylor y Russell Hulse lograron probar la existencia de ondas gravitacionales de manera indirecta. Ambos astrofísicos norteamericanos (premios Nobel 1993) habían observado dos púlsares que giraban uno alrededor del otro y detectaron que se acercaban. La explicación es que ambas estrellas irradian ondas gravitacionales, y por eso pierden energía. El fenómeno observado coincide de manera precisa con las predicciones teóricas.

Las supernovas y las estrellas de neutrones en proceso de fusión, al igual que los agujeros negros, también se consideran fuentes de ondas gravitacionales. Los científicos del Instituto Max Planck de Física Gravitacional calculan lo que ocurre cuando colisionan entre sí. Para ello, se valen de complejas simulaciones de computadora como las que reproduce la imagen, y así se preparan para un caso real. En los próximos años quieren "captar" las ondas gravitatorias con detectores especiales. Para ello, cerca de Hannover, (Alemania) se ha instalado una estación de este tipo: GEO600. Se trata de un complejo sistema óptico que, con dos tubos al vacío de 600 metros cada uno, algún día recibirá los mensajes del cosmos.

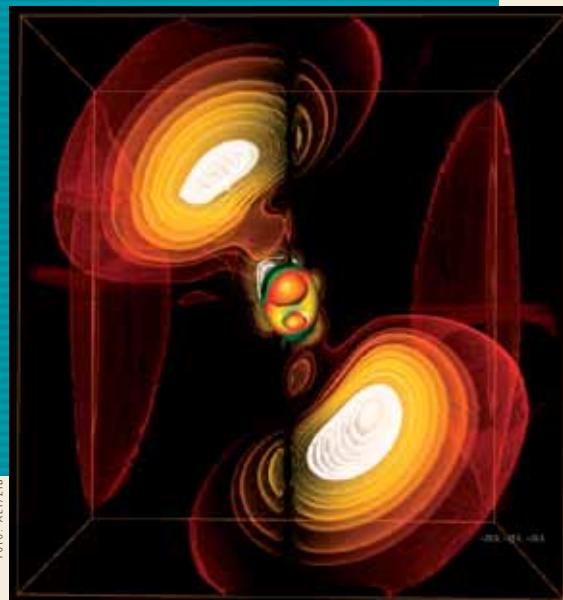


Foto: AEI/IZIB

→ Francia, que suprime la molesta agitación del aire. En uno de los cuatro espejos de 8,2 metros del *Very Large Telescope*, este sistema suministró las imágenes más nítidas jamás obtenidas del centro de la galaxia. S2 fue “la estrella” de las fotos infrarrojas: se acerca a la radiofuente SgrA* hasta unos 12 milisegundos sexagesimales — es decir, a 17 horas luz o tres veces la distancia entre el Sol y Plutón. S2 recorre su órbita Kepler describiendo una marca elipse a una velocidad máxima de 29 millones de kilómetros por hora; tarda 15 años en girar una vez alrededor del centro de gravedad.

DESTELLOS INFRARROJOS EN EL HORIZONTE DE SUCEOS

Un simple cálculo indica que en un esfera espacial con un radio de 17 horas luz, no pueden haber menos de 3,6 +/- 0,4 millones de masas solares. De ello puede derivarse la densidad que es, como mínimo, once órdenes de magnitud mayor que la de los cúmulos estelares más densos hasta ahora conocidos. Independientemente de ello, un cúmulo así sería inestable y tendría una existencia de tan sólo 100.000 años (considerablemente menos que la edad de las estrellas alrededor de SgrA*). Por la enorme densidad también quedan descartados los objetos subestelares. Tampoco sería estable una esfera de partículas elementales (bosones) hipotética. La única explicación es la presencia de un agujero negro.

Parece imposible que semejante “monstruo gravitacional” pueda haber sido el resultado de una única explosión estelar. Por eso, los astrónomos no hablan de un agujero negro *estelar*, sino de uno *supermasivo*. Aún así, un peso pesado como éste debería reunir las mismas propiedades características que los pesos ligeros: por ejemplo, debería rotar.

El 9 de mayo de 2003 los científicos justamente observaron que el punto de luz que había destellado en el monitor era un *flare* infrarrojo. Evidentemente, ese destello proviene del gas que ingresa al agujero negro describiendo una espiral. La materia alcanza su mayor temperatura y se ilumina poco antes de desaparecer detrás del horizonte de sucesos. En esa pequeña región de unas pocas horas luz se suceden condiciones caóticas, similares a tormentas terrestres o erupciones solares. Efectivamente, la luz infrarroja titila unos pocos minutos. Y dos de los *flare* observados daban cuenta de un período de 17 minutos, hecho que se considera un claro indicio de la rotación del agujero ne-



Foto: ESO



◀ Centro de control: desde este lugar, los científicos controlan el *Very Large Telescope* de la Organización Europea para la Investigación Astronómica (ESO) en el observatorio de El Paranal, Chile.

gro a cerca de la mitad del límite de velocidad que admite la Teoría de la Relatividad General.

El monstruo de masa en la Vía Láctea es un caso modelo: los agujeros negros también se ocultan en el centro de la mayoría de otras galaxias espirales con grupos centrales de estrellas (bulbo galáctico) y en las galaxias elípticas. Su masa se incrementa de manera prácticamente lineal a la par de la **intensidad luminosa absoluta** y la velocidad de todas las estrellas del bulbo. Es decir, cuanto mayor sea la masa del núcleo, tanto más masa tendrá el agujero negro. Esta estrecha correlación entre los agujeros negros y las galaxias insinúa una génesis común. Sin embargo, el nacimiento de las galaxias sigue siendo un misterio para los investigadores. Y además ¿qué papel jugaron los agujeros negros?

ACCIDENTES CÓSMICOS COMO PARTEROS GALÁCTICOS

Un escenario posible, es que unos pocos cientos de millones de años después del **Big Bang**, ya existieran estrellas gigantes de hasta 1.000 masas solares. Estallaron como meganovas dejando agujeros negros de masa equivalente. Se acumularon en pozos energéticos fusionándose entre sí y continuaron aumentando de peso “tragando” gas, hasta convertirse en agujeros negros supermasivos. Los quásares (acrónimo en inglés de QUASI-stellar radio source), distantes miles de millones de años luz, dan testimonio de la existencia de estos monstruos en el comienzo del universo. En estos objetos, una región con una extensión de unos pocos años luz emite hasta 100.000 veces más radiación electromagnética que galaxias enteras. De los núcleos se disparan haces de electrones relativistas; además, los astrónomos registran rayos X y Gamma de rápida variación temporal — es decir, procesos como los que se suceden en el interior de los discos de acrecimiento en las inmediaciones de los agujeros negros supermasivos.

Las colisiones cósmicas también parecen ser importantes en la evolución de las galaxias. Los investigadores que colaboran con Günther Hasinger y Stefanie Komossa del Instituto Max Planck de Física Extraterrestre, recientemente descubrieron dos agujeros negros activos en la galaxia NGC 6240 a una distancia de 400 millones de años luz. NGC 6240 da testimonio de la colisión de dos sistemas galácticos. El satélite Chandra no sólo aportó una imagen nítida del centro, sino que también permitió un detallado análisis de rayos X. Los agujeros negros se evidenciaban por un exceso de radiación altamente energética de gases calientes arremolinados en el disco de acrecimiento, y por una radiación fluorescente característica de átomos de hierro. En estos momentos, los dos agujeros negros aún están a unos 3.000 años luz de distancia entre sí. En el transcurso de muchos cientos de millones de años se irán acercando cada vez más sobre sus órbitas espiraladas hasta fusionarse finalmente en un agujero negro de mayor tamaño. Entonces, las ondas gravitacionales harán temblar el espacio.

Por siglos, los agujeros negros se consideraban un mero juego teórico. Pero ahora, la “ficción” se ha transformado en “ciencia”. La era de la observación recién acaba de comenzar. Los astrónomos en la sala de control de Cerro Paranal (**Fig. C**) aún tienen muchas emocionantes noches por delante...

PIE DE IMPRENTA

Sociedad Max-Planck, departamento de información y relaciones públicas, Hofgartenstraße 8, 80539 München / e-mail: presse@gv.mpg.de

Texto: Helmut Hornung

Traducción: Astrid Wenzel

Diseño: www.haak-nakat.de

La versión en español se hizo con el apoyo del DAAD y con fondos del Ministerio de Relaciones Exteriores de Alemania.



SIEMENS

DAAD Deutscher Akademischer Austausch Dienst
Servicio Alemán de Intercambio Académico

BASF
The Chemical Company

200 AÑOS
BICENTENARIO
ARGENTINO

Ministerio de
Ciencia, Tecnología
e Innovación Productiva
Presidencia de la Nación