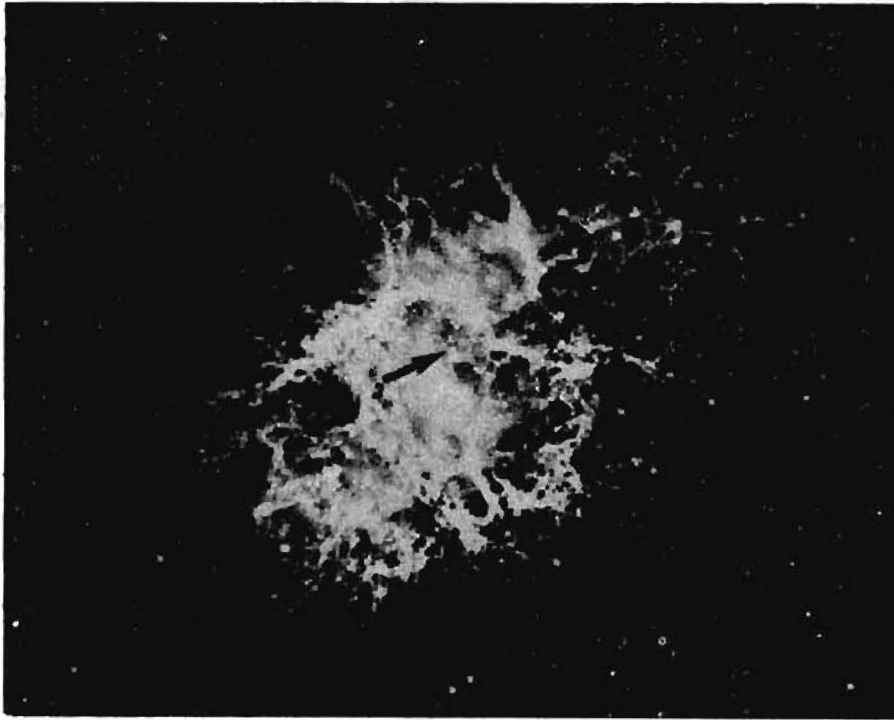


# ¿Existen los Agujeros Negros?

DEBORAH DULTZIN HACYAN



La Nebulosa del Cangrejo. La flecha indica la posición del pulsar (estrella de neutrones). (Foto: Observatorio de Lick).

Algunas de las teorías que han revolucionado de manera más drástica nuestra concepción del mundo, han sido tan adelantadas para su época, que además de explicar una serie de fenómenos naturales, han predicho la existencia de otros cuya realidad es imposible verificar en ese momento. Sin embargo, al pasar el tiempo, con el adelanto de la tecnología, estas predicciones se verifican. Un ejemplo es la Teoría de la Relatividad General (TRG) que predijo hace casi setenta años, la existencia de "agujeros negros" en el Universo.

La TRG es una teoría de la gravitación propuesta por Albert Einstein algunos años después de que él mismo propusiera la Teoría de la Relatividad Especial (TRE). La TRE nació en 1905 y revolucionó la física, con conceptos totalmente nuevos e incomprensibles para el "sentido común". Según la TRE ningún cuerpo o mensaje puede viajar más rápido que la luz, el espacio y el tiempo son conceptos relativos: por ejemplo, el tiempo transcurre más o menos lentamente, según la velocidad de quien lo

mide; es decir, no existe un tiempo absoluto. Además, la TRE introdujo un nuevo concepto: el espacio-tiempo de cuatro dimensiones. Este nuevo espacio es la unión del espacio "común y corriente" —que todos sabemos tiene tres dimensiones— y del tiempo, interpretado como una cuarta dimensión. La constancia de la velocidad de la luz, nos permite medir el tiempo en unidades de longitud y viceversa.

La TRE no es capaz de explicar el fenómeno de la gravitación (la existencia de una fuerza de atracción universal a la cual están sujetos todos los cuerpos y cuya ley fue enunciada por Newton) y por ello, alrededor de 1915, Einstein propuso una nueva teoría: La Relatividad General. Esta teoría contenía la anterior (TRE) y además explicaba la gravitación de una manera realmente revolucionaria: según la TRG los cuerpos deforman el espacio-tiempo a su alrededor. La sola presencia de un objeto masivo produce una curvatura del espacio-tiempo, y es esta curvatura la que es sentida por otros cuerpos como atracción gravitacional. Debido a la curvatura del espacio-tiempo alrededor de un cuerpo masivo, otro cuerpo que pase cerca, no seguirá como trayectoria una línea recta, sino una trayectoria curva. Esto, en la práctica, es lo que se observa como atracción gravitacional.

La deformación del espacio-tiempo actúa también sobre los rayos de luz: por ejemplo, los rayos de luz provenientes de las estrellas lejanas se curvan ligeramente al pasar cerca del Sol (este efecto, predicho por la TRG, se ha podido comprobar observando las estrellas cerca del disco solar durante un eclipse de Sol). Además la TRG predice, como la TRE, una relatividad del tiempo: un observador lejano vería que el tiempo transcurre más lentamente cerca de un cuerpo cuyo campo gravitacional sea sumamente intenso.

La curvatura de una superficie ordinaria se estudia mediante la geometría. Para estudiar la curvatura del espacio-tiempo de cuatro dimensiones producida por los cuerpos masivos, se usa una geometría llamada la Geometría de Riemann. Con esta herramienta matemá-

tica Einstein obtuvo las ecuaciones que nos dan el campo gravitacional a partir de la geometría del espacio-tiempo.

En 1916 Schwarzschild obtuvo la primera solución a dichas ecuaciones, para el caso particular de una estrella, o cualquier cuerpo masivo que tenga la forma de una esfera. Esa solución de Schwarzschild se reducía, en primera aproximación, a la ley de gravitación de Newton y, en segunda aproximación, predecía efectos casi imperceptibles, pero que hoy en día han sido comprobados con bastante precisión, entre ellos: la curvatura de los rayos luminosos al pasar cerca del Sol y el corrimiento del perihelio de los planetas. Aparte de estos efectos, todos muy importantes, pero que, por falta de espacio, no podemos examinar con más detalle, la solución de Schwarzschild predecía un fenómeno curioso: si un cuerpo de masa  $M$  tiene toda su masa concentrada en una esfera de radio  $2GM/c^2$ , llamado radio de Schwarzschild ( $G$  es la constante de gravitación y  $M$  la masa del cuerpo, y  $c$  la velocidad de la luz), entonces ningún cuerpo, ni la luz, ni ningún tipo de información, podría escaparse desde dentro de esa esfera.

En el lenguaje de la relatividad general se puede decir que el espacio-tiempo se curva a tal grado que... ¡se cierra sobre sí mismo! Todo lo que está atrapado en ese pedazo de espacio cerrado nunca podrá salir al mundo exterior. Un objeto puede entrar en este "agujero negro", pero, nunca podrá escaparse de ahí.

Existe otra manera de comprender lo que significa un agujero negro, y esta idea se le había ocurrido ya a Laplace a fines del siglo XVIII.

Es bien sabido que para poder escaparse de un cuerpo celeste —por ejemplo, un planeta como la Tierra— es necesario alcanzar una cierta velocidad, llamada velocidad de escape, que para la Tierra es de 11.2 km/seg. Si una nave cohete no alcanza esta velocidad, llegará de todos modos a cierta altura, pero después la Tierra lo atraerá hacia abajo otra vez. Esa velocidad de escape depende de la masa del cuerpo celeste y de su radio (más precisamente, de la distancia entre el centro del cuerpo celeste y la superficie desde la cual se lanza el cohete). Por ejemplo, la velocidad de escape desde la superficie del Sol es de 615 km/seg. Ahora bien, ¿qué pasaría si el radio del Sol fuera la cuarta parte de lo que es permaneciendo su masa constante? ... En ese caso la velocidad de escape sería el doble: 1,230 km/seg. En general, mientras más pequeño es el radio y mayor es la masa de un cuerpo celeste, mayor es su velocidad de escape. Por ejemplo, si una estrella tuviera la misma

masa que el Sol, pero un radio menor que 3 km, entonces la velocidad de escape sería mayor que la velocidad de la luz: 300,000 km/seg. ¿Y qué quiere decir esto? ... Siguiendo el razonamiento de Laplace, un cuerpo celeste con esas características no dejaría que se escape de su superficie ningún rayo de luz, ni ningún otro objeto (como hemos dicho antes, la TRE nos dice que velocidades superiores a la de la luz son imposibles). En pocas palabras, ese cuerpo celeste no emitiría ni el más leve rayo de luz, y para cualquier observador sería un "hoyo negro" en medio del espacio.

Antes del descubrimiento de la TRG no se sabía que la luz también era afectada por la gravedad, de modo que las ideas de Laplace fueron tomadas como mera especulación. Por otro lado, la masa de un "hoyo negro" debería estar concentrada en un volumen increíblemente pequeño. Por ejemplo, para que una estrella de la masa del Sol se vuelva "agujero negro", tendría que comprimirse en una esfera de sólo 3 km de radio. Esto, a su vez, implicaría que la densidad fuera tal que una cucharadita de agujero negro pesaría alrededor de diez mil millones de toneladas! ¿Pueden realmente existir tales cuerpos en el Universo? Aún suponiendo que existen, ¿de dónde vienen, y cómo pudieron formarse?

La respuesta a esta última pregunta la ha dado recientemente la astrofísica. Y, en particular, la teoría de la evolución estelar.

### Estrellas y agujeros negros

Uno de los fenómenos más difíciles de explicar para la teoría de la evolución estelar es: cómo se forman las estrellas. La hipótesis más aceptada nos dice que las estrellas se forman de las nubes de gas y polvo que hay en el medio interestelar. Cuando este material se condensa, se forma una "protoestrella", que después se sigue contrayendo por la acción de su propia gravedad. Al contraerse, la temperatura y la presión en el centro aumentan y llega un momento en que son tal altas que en el interior de la estrella se empieza a desencadenar una serie de reacciones, llamadas termonucleares; en este momento, la estrella "se enciende". Las estrellas están hechas fundamentalmente (en un 80 por ciento) de hidrógeno (H); las reacciones termonucleares transforman el hidrógeno en helio (He) y esta transformación libera cantidades fabulosas de energía, en forma de luz y calor. En estas condiciones, la presión en el centro de la estrella es muy alta, tanto que contrarresta la acción de la gravedad. La estrella no se

sigue contrayendo, ni tampoco se desintegra, es decir, se establece un equilibrio (equilibrio entre las fuerzas de gravedad y presión que actúan en sentido opuesto).

La vida de cada estrella es diferente (dependiendo fundamentalmente de qué tanta masa tenga la estrella), pero, en una forma muy general, la historia se puede resumir así:

Cuando casi todo el H de la estrella se ha transformado en He, se rompe el equilibrio y la estrella se contrae. La temperatura en el centro aumenta todavía más, hasta llegar un momento en que es tan alta que el helio se empieza a transformar en carbón; vuelve el equilibrio y, al agotarse el helio, se repite el ciclo: esta vez el Carbono se transmuta y así sucesivamente hasta formarse el hierro (Fe). Cada una de estas reacciones de transformación libera menos energía que la anterior. Cuando la estrella es fundamentalmente de Fe, podemos decir que empieza a agonizar, pues to que ya no es capaz de emitir más energía por reacciones termonucleares. ¿Qué le sucede entonces? ¿Cómo mueren las estrellas?

Algunas estrellas explotan y vuelven a ser lo que eran antes de formarse: nubes de gas y polvo. Pero, en la mayoría de los casos, la estrella, al explotar, no se desintegra por completo, queda una parte, llamada el "residuo" de la explosión. A las estrellas que explotan, se les llama "Supernovas".

¿Qué sucede con las que no explotan? ¿Y con los residuos de las que explotaron? Sucede que al no haber ya reacciones nucleares, la presión interna no es capaz de soportar el peso de las capas exteriores y la estrella se contrae, disminuye su radio paulatinamente, aumenta su densidad (se vuelve más y más compacta) y se va enfriando. Ahora bien, pensemos en el siguiente problema: ¿Qué tan compacto puede ser un cuerpo? En otras palabras, ¿existe algún límite a la contracción gravitacional? Este problema se ha estudiado desde hace muchos años.

En 1930, Chandrasekhar encontró que una estrella con una masa menor que 1.4 masas solares ( $1.4 M_{\odot}$ ), que es como escriben los astrónomos), en el transcurso de la contracción gravitacional que sufre al final de su vida, puede llegar a una configuración de equilibrio en la que la contracción se detiene. La explicación de Chandrasekhar es la siguiente: Al contraerse la estrella, llega un momento en que la materia de la estrella se vuelve tan densa que los electrones de la estrella pasan a un estado, llamado por los físicos, "estado degenerado", en el cual la presión ejercida por los electrones es tan alta que puede de-

tener la contracción. De esta manera, se llega a una configuración de equilibrio en la que los electrones soportan el peso de las capas exteriores de la estrella. Estas configuraciones corresponden, en la práctica, a las estrellas conocidas como *enanas blancas*. Ahora bien, si la masa de una estrella, al iniciarse la contracción, es mayor que  $1.4 M_{\odot}$ , entonces los electrones no son capaces de soportar el peso de la estrella y ésta se sigue contrayendo. ¿Hasta cuándo?

En 1932 Landau demostró, teóricamente, que si la masa de la estrella fuera menor que  $3 M_{\odot}$  (en la actualidad este límite oscila entre 2 y 3 masas solares), la estrella todavía tendría salvación. Landau planteó que, en este caso, la estrella debería llegar nuevamente a un estado de equilibrio. Poco después de la publicación de Landau, en el mismo año, fue descubierta una nueva partícula atómica: el neutrón (cuyo nombre viene de que no tiene carga eléctrica); y, en 1933-34, los astrónomos Bæde y Zwicky hablaron por primera vez de la posibilidad de la existencia de "estrellas de neutrones", y de su posible relación con las explosiones de Supernovas. Se pensó que podría ser en estas estrellas, precisamente, en las que se alcanzaría la nueva configuración de equilibrio, de la que hablaba Landau.

En estas estrellas, la densidad sería tan alta que los protones (que son positivos) chocarían con los electrones (negativos) para formar neutrones. De esta manera los núcleos atómicos se desintegrarían y todo el material de la estrella se convertiría en un "gas degenerado de neutrones", el cual, de manera análoga a como actúa el gas degenerado de electrones en las enanas blancas, ejercería la presión suficiente para detener la contracción gravitacional de la estrella.

Esta teoría, sin embargo, salva del colapso total sólo a las estrellas con masas menores que  $3 M_{\odot}$ . ¿Qué sucedería con las más masivas? (y se sabe que existen muchas estrellas con masas hasta de  $50 M_{\odot}$ ). En 1939 Oppenheimer y Snyder demostraron que estas estrellas no podrían tener salvación. Que en este caso no podía existir *ninguna* configuración de equilibrio capaz de detener la contracción gravitacional, produciéndose entonces el *colapso gravitacional* de la estrella, que se haría cada vez más y más pequeña, más y más densa, hasta convertirse en...? en uno de esos objetos celestes de los que hablaba Laplace: tan compactos que se vuelven invisibles, en uno de esos objetos tan densos, que el espacio a su alrededor se curva a tal punto que la luz queda atrapada, y de esta manera el objeto pierde toda conexión con el mundo exterior, desaparece del Universo dejando sólo: un hoyo negro.

Ahora nos podemos preguntar: muy bien, pero, ¿qué relación tienen todas estas teorías con la realidad? ¿Existen realmente las estrellas de neutrones y los hoyos negros?

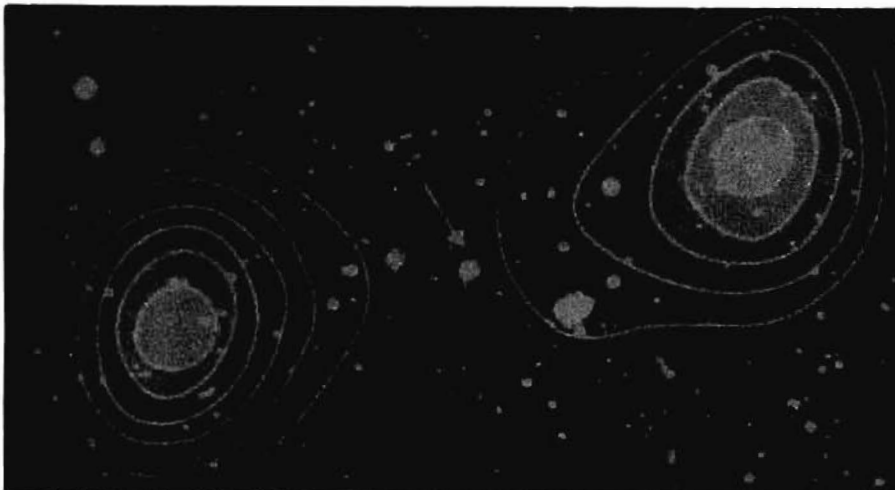
Las enanas blancas se conocían ya desde antes de que fuesen estudiadas teóricamente. Efectivamente, todas las que se conocen tienen masas menores que  $1.2 M_{\odot}$ , sus radios van de 3,000 a 20,000 km y sus densidades son tan altas que un  $\text{cm}^3$  pesa ¡una tonelada!

Las estrellas de neutrones se descubrieron 35 años después de que se había predicho su existencia. En 1968 se publicó un pequeño trabajo en el que se anunciaba que los radiotelescopios habían detectado un nuevo tipo de objetos celestes: unas fuentes de radio, muy compactas, que emitirían pulsos regulares de unos cuantos segundos. Se les llamó "*pulsares*". En el mismo año, Gold ex-

plícó, a partir de consideraciones teóricas, que estos nuevos objetos debían ser estrellas de neutrones en rotación, y esta idea se confirmó posteriormente por las observaciones.

Si un hoyo negro no emite ni luz, ni ninguna otra señal ¿cómo podemos saber si existe o no? Desde luego que no podemos *ver* un hoyo negro, pero sí podemos detectar su presencia. Ya hemos visto que el campo gravitacional cerca de un hoyo negro es enormemente intenso (en otras palabras: el espacio a su alrededor está muy deformado). Existe una manera muy ingeniosa de detectar la presencia de hoyos negros a través de efectos gravitacionales. Para entender esta idea, es pertinente explicar brevemente lo que es un *sistema binario*.

La gran mayoría de las estrellas no están aisladas, sino que forman sistemas de dos, tres o más estrellas que interactúan gravitacionalmente entre sí. A un sistema de dos estrellas unidas gravitacionalmente, se le llama doble o sistema binario. En estos sistemas, ambas estrellas giran alrededor del centro de masa del sistema. Si las estrellas están suficientemente separadas entre sí, se pueden ver ambas a simple vista o con el telescopio, pero hay algunos sistemas que no pueden resolver (ver las dos estrellas por separado) ni con los telescopios más potentes. En estos casos, en que vemos una sola estrella, existe otro tipo de información que nos puede indicar que se trata en realidad de una estrella doble (o sistema binario): si el plano de las órbitas de las estrellas alrededor del centro de masa está sobre la línea visual (o muy ligeramente inclinado respecto a ésta), las estrellas se eclipsarán mutuamente al pasar una frente a otra; y esto se manifiesta como una variación en el brillo de la estrella visible (que corresponde a distintas porciones de las dos componentes). Tenemos además otra información muy importante: el espectro.\* En muchos casos al tomar el espectro de una estrella, aparecen dos espectros sobrepuestos y, si sacamos una secuencia de espectros, podemos detectar el desplazamiento de las líneas hacia el rojo o hacia el violeta, producido por efecto Doppler.\*\* Aun



Radio galaxia Círculo A. La flecha indica la posición de la galaxia visible ópticamente. Se han dibujado sobre la fotografía, los isocontornos de las regiones emisoras en radiofrecuencia. (Foto: Observatorio de Hale).

\* Al hacer pasar la luz de la estrella a través de un prisma o rejilla de difracción, obtenemos el espectro. En él aparecen un continuo y una serie de líneas características que nos dan información sobre la temperatura y otras características de la estrella.

\*\* El efecto Doppler nos dice que si la fuente luminosa está en movimiento con respecto al observador, la longitud de onda de las ondas luminosas aumenta o disminuye (es decir, se ve desplazada hacia el rojo o hacia el violeta) según si la fuente se aleja o se acerca.

en el caso en que veamos un solo espectro, podemos saber de la presencia de otra componente por el movimiento orbital que se refleja en el desplazamiento de las líneas. Se sabe también que si las dos componentes de un sistema binario están muy cercanas entre sí, puede haber un flujo del material de una hacia la otra (o entre ambas) debido a la atracción gravitacional. A este proceso se le llama: "acreción" de materia.

¿Qué sucedería si en uno de estos sistemas binarios una de las componentes fuese un hoyo negro y la otra una estrella normal? En primer lugar, es evidente que veríamos una sola estrella y un solo espectro (el de la estrella), pero con las líneas desplazadas por efecto Doppler. No podríamos observar ningún efecto de eclipse, puesto que las dimensiones del hoyo negro son tan pequeñas (unos cuantos kilómetros) que su paso frente a la estrella sería indetectable. Pero el punto clave es el siguiente: se ha encontrado, teóricamente, que si en un sistema binario, es un hoyo negro o una estrella de neutrones lo que se está "chupando" el material de la otra estrella, el fenómeno de acreción sería tan intenso que debería emitirse una gran cantidad de energía en forma de rayos X. Ahora bien, para distinguir entre la presencia de un hoyo negro y una estrella de neutrones, todo lo que necesitamos es conocer la masa del objeto (como ya hemos visto, si la masa es mayor de unas  $2.5 M_{\odot}$ , tiene que ser un hoyo negro).

Mediante las observaciones del cielo, realizadas desde satélites artificiales, se han logrado detectar unas 100 fuentes de rayos X en nuestra galaxia. Algunas de estas fuentes son regiones extendidas (nebulosas, etc.) y otras vienen de regiones muy compactas (estrellas o sistemas de estrellas). De este tipo de fuentes de rayos X (compactas), varias se han identificado ópticamente con sistemas binarios. Más aún, con estrellas de las que se sabe desde hace tiempo, que deben ser dobles a pesar de que se observa *un solo* espectro. Uno de los ejemplos más interesantes (por ser el objeto más estudiado hasta ahora) es el de la fuente de rayos X llamada Cyg. X-1 (que está en la constelación del Cisne). Esta fuente se ha identificado con una estrella doble en la que el compañero no se ve (no aparece su espectro). Sobre el espectro de la estrella aparecen ciertas líneas, no pertenecientes al espectro estelar, y de las cuales se puede deducir la existencia de un flujo de material estelar que sale de la estrella y va hacia el objeto invisible. Ahora el punto fundamental: ¿Cuál es la masa de ese objeto invisible? Desgraciadamente, esto es precisamente lo más difícil de

calcular, ya que se puede hacer sólo por métodos indirectos. Sin embargo, los cálculos realizados indican que la masa de este objeto es mayor que  $10 M_{\odot}$ !

Para muchos astrónomos y físicos toda esta evidencia es contundente, y están convencidos de que en el Cisne se ha descubierto el primer hoyo negro. Para otros, sin embargo, la evidencia es convincente, mas no contundente.

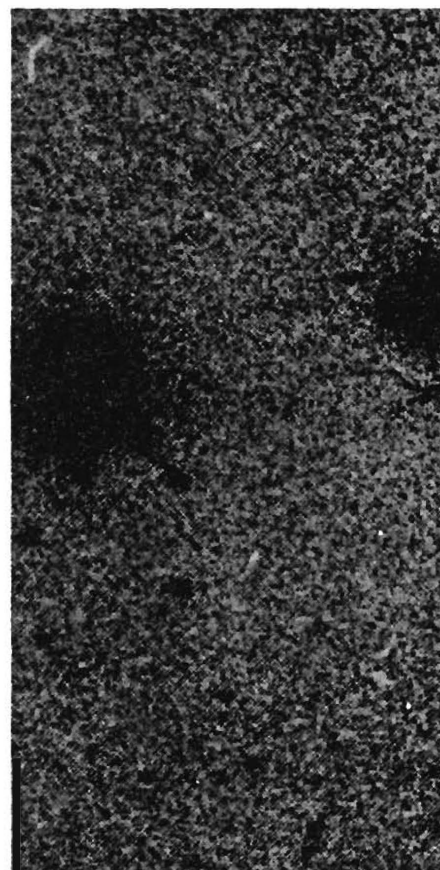
### Galaxias y agujeros negros

Las estrellas en el Universo se agrupan en grandes sistemas llamados galaxias. Nuestra galaxia, la Vía Láctea, tiene aproximadamente cien mil millones de estrellas y mide, en su máxima extensión, cien mil años luz aproximadamente un trillón de kilómetros. El Sol se encuentra cerca del borde de la galaxia a unos novecientos mil millones de kilómetros del centro de la galaxia.

Hasta hace relativamente poco, las galaxias se consideraban sistemas estables de estrellas, gas y polvo. Se creía que su apariencia podía cambiar debido solamente a la evolución estelar y la rotación galáctica. En los últimos diez años, ha llamado la atención el papel del núcleo galáctico, una pequeña región que, hoy en día, se considera como responsable de los fenómenos energéticos más espectaculares conocidos en el Universo.

El primer indicio de que los núcleos galácticos son escenarios de violenta actividad fue encontrado por Seyfert, quien descubrió, a mediados de los años cuarenta, un grupo de galaxias espirales con núcleos muy brillantes y líneas peculiares en sus espectros. Estas líneas no eran las líneas típicas que producen las estrellas, sino que son emitidas por una región gaseosa extendida a muy alta temperatura. Además las líneas eran muy anchas, lo que indicaba movimientos del gas con velocidades de varios miles de kilómetros por segundo.

La importancia de este descubrimiento no pudo apreciarse sino hasta unos diez años después, cuando se acumuló más evidencia de la actividad nuclear de la galaxia con el descubrimiento de las "radiogalaxias". Este tipo de galaxias emiten energía en ondas de radio con una gran potencia. En estos objetos, la radioemisión proviene de dos gigantes nubes de gas a temperaturas sumamente altas (plasma) situadas a ambos lados de una galaxia central. Estas nubes no son ópticamente visibles (emiten ondas de radio, pero no luz), aunque frecuentemente la galaxia central que originó estas nubes sí es visible. Las nubes de gas emisoras de radio tienen típicamente un diámetro de unos seiscientos



Al centro el cuasar 3C 273. La orientación del chorro es en la dirección Sur-Oeste. (Foto: Greenstein y Schmidt).

mil trillones de kilómetros y se encuentran a una distancia aproximada de un millón doscientos mil trillones de kilómetros de la galaxia central. La estructura de estos objetos sugirió, casi desde su descubrimiento, la idea de que las nubes de plasma se originan por la eyección de partículas llamadas relativistas (cuyas velocidades son cercanas a la de la luz) desde el núcleo de la galaxia, en direcciones opuestas y a lo largo del eje de rotación.

La primera evidencia inequívoca de este tipo de eyección nuclear la proporcionó el estudio de la galaxia M87. El chorro de plasma ( $\sim$  treinta mil billones de kilómetros de largo) se origina claramente en un núcleo brillante de la galaxia y está casi alineado con el eje mayor de la galaxia.

Aunque la eyección de chorros de materia con altas energías desde el núcleo no es la única manifestación de actividad nuclear, es un aspecto muy importante que debe explicar un modelo teórico; más adelante, volveremos sobre este punto.

Poco a poco se fueron acumulando otras observaciones que indicaban la existencia de potentes fuentes de energía en el núcleo de muchas galaxias,

pero la magnitud a la que podía llegar este fenómeno se presentó en toda su plenitud a principios de los años 60 con el descubrimiento de los *cuasares*.

Los cuasares son los objetos extragalácticos (fuera de nuestra galaxia) más lejanos que se conocen. Su apariencia es estelar (se ven como estrellas azules en placas fotográficas), y tienen una emisión de energía en el óptico de cien veces la energía emitida por toda una galaxia gigante. Esta energía, sin embargo, proviene de una región de dimensiones comparables a las de un núcleo galáctico o menos (unos cien mil millones de kilómetros). Aproximadamente un 10 por ciento son también potentes emisores de radio, y, de hecho, fue a partir de esta emisión como se descubrieron.

Uno de los primeros cuasares descubiertos fue el objeto llamado 3C 273, hasta la fecha el mejor estudiado por ser el de mayor brillo aparente (de hecho, como veremos, es el cuasar más cercano a nosotros).

Mediante ocultaciones lunares se logró separar la estructura de la emisión de radio frecuencia en dos componentes separadas unos 20 segundos de arco entre sí. Cuando la fuente de radio pudo ser identificada ópticamente, se encontró que una de las componentes correspondía, en posición, a lo que parecía una estrella azul, mientras que la otra, a un chorro de materia visiblemente ligado a la "estrella".

Sin embargo, la naturaleza verdaderamente extraordinaria de este objeto la reveló su espectro (ver pie de página en el inciso anterior). En apariencia, el espectro era similar al de las galaxias Seyfert y las radiogalaxias. M. Schmidt logró identificar líneas de hidrógeno con un corrimiento al rojo muy grande. Este corrimiento, interpretado en términos del efecto Doppler (ver explicación en pie de página del inciso anterior), implica que la fuente tiene una velocidad de recesión (alejamiento)/—debida a la expansión del Universo de 0.15 c (c es la velocidad de la luz).

Hubble descubrió una relación entre la velocidad de recesión y la distancia, que se conoce como la ley de Hubble. En primera aproximación, esta ley es  $v = Hr$  (H es la llamada constante de Hubble, y r es la distancia de nosotros al objeto que se aleja). Usando esta aproximación se obtiene una distancia de unos 2,500 millones de años luz ( $2 \times 10^{22}$ , es decir, un dos seguido de 22 ceros, km) para el cuasar *más cercano*.

Muchos más cuasares se identificaron rápidamente (hoy en día se conocen aproximadamente 1,500), de los cuales 15 resultaron ser objetos del catálogo de objetos azules compactos elaborado por

Chavira e Iriarte a fines de los años cincuenta, usando una técnica fotográfica descubierta por Guillermo Haro. Estos 15 cuasares llevan el nombre del Observatorio de Tonantzintla.

Para explicar la generación de las enormes cantidades de energía en volúmenes tan compactos como sucede en los cuasares —y, aunque en menor escala, en los núcleos de muchas galaxias— los astrónomos Zeldovich, Novikov y Salpeter propusieron la idea, hacia 1964, de que en el centro de estos objetos se aloja un gigantesco agujero negro y que la energía se genera por acreción de materia que cae al agujero negro. Han pasado casi veinte años desde la formulación de esta teoría y, hasta ahora, todo parece indicar que es la mejor explicación.

Es importante aclarar que, a diferencia de la formación de un agujero negro por el colapso gravitacional de una estrella, (proceso que ha sido estudiado cuantitativamente), el proceso que puede dar lugar a la formación de un agujero negro supermasivo en el núcleo de una galaxia es un problema completamente abierto.

Aunque no se conoce el proceso mediante el cual se formaría este "super-agujero negro", es claro que cualquier opción alternativa que se ha considerado para generar energía de origen gravitacional conduce finalmente a la formación de un agujero negro y que, una vez formado, es la fuente de energía más eficiente posible. Por lo tanto, parece razonable suponer que el proceso que genera la energía de los cuasares y de los núcleos de muchas galaxias es la acreción de material a un agujero supermasivo ( $10^6 - 10^{10} M_{\odot}$ , entre un millón y 10,000 millones de veces la masa del Sol), en el centro.

Por lo que se refiere al origen de los agujeros negros en el núcleo de las galaxias, existe una idea alternativa a la del colapso en el núcleo de la galaxia ya formada; esta idea es que dichos agujeros negros se formaron por inestabilidades del Universo en etapas muy tempranas, en etapas anteriores a la formación de las galaxias. En este esquema, las galaxias se formarían alrededor de los agujeros negros de origen primordial.

Independientemente de su origen, podemos partir del supuesto de que existe un agujero negro supermasivo en los núcleos de las galaxias activas (incluidos los cuasares). La siguiente consideración es el suministro de materia suficiente para generar energía por acreción, o, como se ha hecho costumbre decir, "el alimento del monstruo".

Esta materia puede provenir de varias fuentes (no excluyentes entre sí), principalmente:

- a) Gas de la parte de afuera de la galaxia, o extragaláctico que llega al núcleo debido a un choque o interacción con otra galaxia.
- b) Gas del núcleo.
- c) Gas de estrellas de la galaxia que van aventando masa como un "viento estelar".
- d) Estrellas del núcleo que se desintegran, se rompen por intensas fuerzas de marea cerca del agujero negro y caen a él.

También en este caso, como en el de los sistemas binarios, (ver sección anterior), el material (cualquiera que sea su origen, estrellas enteras, rotas o gas), debe formar un disco de acreción alrededor del agujero negro antes de caer. Y también en este caso, en este disco es donde se genera la enorme cantidad de energía que observamos. El disco, no es necesariamente delgado (aplanado), sino que puede tener un grosor considerable, entonces se forma una especie de vértice o cañón en la parte central (borde interior del disco) que canaliza el disparo (en la dirección perpendicular al plano del disco) de chorros de partículas muy energéticas que logran escapar de la caída al agujero negro y que dan lugar a los chorros de plasma de que hemos hablado al principio de este inciso.

Una de las preguntas más interesantes que se plantean actualmente en astrofísica es la de si existe una relación evolutiva entre los cuasares (que por estar tan lejos también representan objetos que datan de épocas muy remotas en el tiempo) las radiogalaxias, otros tipos de galaxias con actividad en el núcleo (como las de Seyfert) y las galaxias "normales" (como la nuestra). ¿Todas las galaxias tuvieron alguna vez actividad en el núcleo? ¿Existe un enorme agujero negro en el centro de todas las galaxias (sólo que en alguna ya no hay acreción y por lo tanto la actividad disminuye o desaparece)? Esta es una cuestión a investigar en el futuro próximo.

#### Más lecturas sobre el tema

1. "Los Agujeros Negros, los Cuasares y el Universo", H. L. Shipman, editorial "Alhambra".
2. "Agujeros negros", Naturaleza Vol. 11 No. 6, 1980, S. Hacyan.
3. "Gravitación y muerte de estrellas", Ciencia y Desarrollo, Vol. enero-febrero 1984, D. Dultzim-Hacyan.
4. "Black Holes" Scientific American, diciembre 1974, K. Thorne.