

Los cuasares son objetos celestes que por más de treinta años han cautivado e intrigado a los astrónomos. El primero se descubrió en 1960, pero no fue sino hasta 1963 cuando los astrónomos comprendieron (o creyeron comprender) lo que estaban viendo. Aunque el objeto tenía la apariencia de una débil estrellita azul, desde un principio se sospechó que no se trataba de ninguna estrella ordinaria, pues fue detectada por su emisión de radiofrecuencia. Sólo después pudo ser identificada como un objeto visible, ya que las estrellas no emiten con esa intensidad.

Una de las técnicas más usadas en astronomía para analizar la luz de los objetos es la espectroscopia, mediante la cual podemos descomponer la luz blanca y analizar por separado los diferentes colores (longitudes de onda o frecuencias) que la componen. Pues bien, al analizar el espectro de este primer cuasar quedó de inmediato claro que, a pesar de su apariencia de “estrellita azul”, no se parecía a nin-

guna estrella en sus características espectrales (que reflejan básicamente la temperatura). De hecho, no era similar a ningún cuerpo celeste conocido hasta entonces. Marten Schmidt resolvió este enigma cuando logró identificar, en el espectro de uno de estos objetos, el patrón de emisión producido por el hidrógeno, el elemento más abundante en el Universo. Sin embargo, las longitudes de onda que

aparecían en este patrón habían sido desplazadas sistemáticamente hacia el lado rojo del espectro (aparecían con longitudes de onda mayores que en el laboratorio). El desplazamiento era tan grande, que los astrónomos tardaron tres años en encontrar un patrón reconocible, el cual, al poco tiempo, fue utilizado para identificar otros objetos similares.

Después de haber descartado otras posibles causas de este desplazamiento al rojo, vino la interpretación aceptada, hasta el día de hoy, por la gran mayoría de los astrónomos; que es la expansión del Universo lo que causa

## Cuasares

**DEBORAH DULTZIN**

el alejamiento entre las galaxias. Ésta es una de las predicciones más importantes que se desprende de la teoría de la relatividad general, formulada por Albert Einstein alrededor de 1915, y que fue comprobada por Edwin Hubble unos años más tarde, quien logró establecer una relación entre la distancia a la que se encuentra una galaxia de nosotros y su aparente velocidad de alejamiento causada por la expansión del Universo.

Esta correlación se conoce como la Ley de Hubble, que dice que la velocidad de recesión (o alejamiento) es mayor, cuanto más lejos se encuentra una galaxia en proporción directa a su distancia. El corrimiento al rojo de los patrones espectrales ya se había detectado en muchas galaxias (aunque nunca en forma tan drástica como apareció en los cuasares), y mediante la Ley de Hubble se medía la velocidad de recesión que se usaba para determinar la distancia a galaxias lejanas. El desplazamiento al rojo se designa con la letra  $z$ .

Aplicando esta ley se obtiene una distancia tal, que la luz debe viajar dos billones y medio de años para llegar a nosotros desde este objeto (esto se expresa al decir que el objeto se encuentra a dos billones de años luz de distancia). Entonces quedaba claro que no se trataba de una

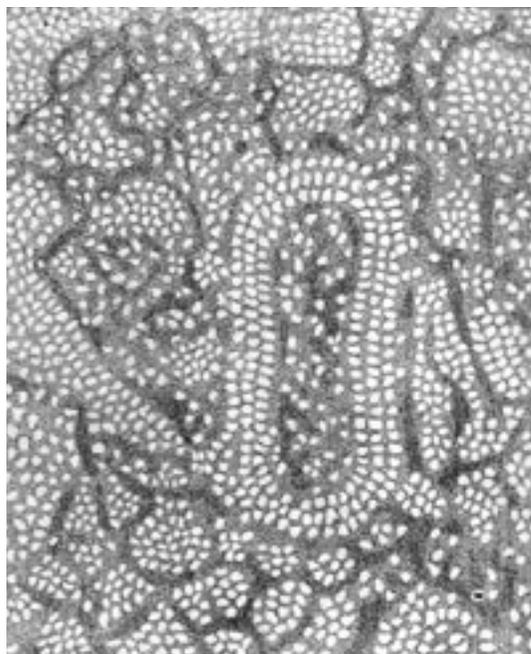
estrella, sino de un objeto fuera de nuestra galaxia, siendo el más lejano conocidos hasta entonces.

El nombre cuasar es una castellanización del vocablo inglés *quasar*, formado por las siglas: *quasi-stellar radio source*. Hoy día se conocen más de siete mil cuasares, quince de los cuales llevan el nombre del observatorio mexicano de Tonantzintla. 3C273 es el más cercano con un el valor es  $z = 0.158$ , esto es 15,8 %. Mientras que el más lejano detectado hasta ahora, tiene su espectro corrido al rojo en casi 500% ( $z = 4.897$ ), lo que implica una velocidad de recesión muy cercana a la de la luz (treientos mil kilómetros por segundo) —que es la velocidad límite en la naturaleza para el movimiento de la materia y la energía— y que lo sitúa en los confines del Universo observable. La variabilidad en el brillo de algunos cuasares fue el siguiente hallazgo. Se encontró que existían algunos que duplicaban su emisión de luz en un día, lo cual indica que la región que produce esta luz no puede ser mayor que “un día luz” o veinticinco millones de kilómetros (dos veces el tamaño del Sistema Solar). Es decir, que algunos cuasares producen mucho más energía que una galaxia normal —con sus cientos de miles de millones de estrellas— como el Sistema Solar.

Mientras que, por un lado, en los últimos veinte años se ha realizado un intenso trabajo por observarlos en todas las frecuencias posibles, desde las radiofrecuencias (radiación de baja energía) hasta los rayos gamma (la radiación más energética) —lo que ha sido posible gracias al gran avance de la tecnología astronómica de los observatorios espaciales—, por el otro se han intentado formular teorías que puedan explicar los fenómenos físicos que ocurren en los cuasares y, muy especialmente, que puedan dar cuenta de la fuente de tan colosal energía. Hay una serie de fenómenos asociados a los cuasares que son imposibles de explicar mediante algún tipo de radiación estelar conocida, como los chorros de plasma colimados que son emitidos por los objetos radiofuentes, la emisión de rayos gamma y la actividad de los “primos hermanos” más cercanos a los cuasares, llamados *blazares*, de los que hablaremos más adelante. Además, los datos de variabilidad en las frecuencias de rayos x ponen límites aún más estrictos al tamaño de donde proviene la emisión de esta energía.

#### De “lagartos” y otros bichos

Algo que ha ido quedando claro a lo largo de todos estos años es que los cuasares no representan un fenómeno tan insólito en el Universo, como se pensó en un principio. Al ir juntando pacientemente las piezas del gran rompecabezas, ha surgido el hecho de que fenómenos muy similares ocurren en los núcleos de algunos tipos de galaxias; por ejemplo, en las radiogalaxias y en las conocidas como galaxias *Seyfert* (en honor a su descubridor). Los núcleos de todos estos objetos son muy parecidos a los cuasares, aunque varía la potencia emitida de un tipo a otro, y también algunas otras características como la morfología de la galaxia circundante al núcleo. Se sabe, por ejemplo, que los núcleos de las radiogalaxias “viven” en galaxias de forma elíptica, mientras que los núcleos de las galaxias *Seyfert* “viven” en galaxias de tipo espiral. Los cuasares son tan brillantes que no ha sido fácil detectar la galaxia circundante. El problema se debe al contraste, ya que mientras el núcleo es brillantísimo, la nebulosidad circundante es muy



tenua (recordemos que se trata de objetos muy lejanos). Esto ha sido posible gracias a las técnicas digitales modernas con las cuales se pueden obtener y manipular imágenes astronómicas, y al aumento en el tamaño de los telescopios de nueva tecnología. Sin embargo, se han logrado detectar varias de las nebulosidades alrededor de los cuasares. Desde luego, resulta imposible reconocer estrellas en esas nebulosidades para asegurar que son galaxias como las conocidas; también es difícil hablar de su morfología, aunque lo que sí parece ser una característica común es que todas presentan morfologías sumamente perturbadas.

Todos estos objetos se agrupan bajo el nombre común de “núcleos activos de galaxias”, y el encuentro energético de este fenómeno lo constituyen unos objetos conocidos como tipo BL Lac. En los setentas se descubrió una serie de objetivos que presentaban características semejantes a los cuasares, pero mucho más extremas; además de la potencia, presentan una diferencia importante que es la dificultad por detectar sus líneas espectrales. Cuando finalmente se logró encontrar líneas débiles en el objeto prototipo, conocido hasta entonces como la “estrella variable” BL Lacérate (estrella BL en la constelación del Lagarto), se descubrió que ésta tampoco era una estrella, sino un objeto situado fuera de nuestra Galaxia y sumamente

lejano. El conjunto de los objetos tipo BL Lac —o lagartos— y los cuasares, cuya luminosidad varía más violentamente en el óptico (*ovv*, *Optically Violently Variable*), constituye la clase de objetos conocidos como blazares.

Las tres propiedades en común más importantes de todos los núcleos activos de galaxias es que son de altísima luminosidad, poseen radiación de electrones ultrarrelativistas —es decir, que están acelerados a velocidades cercanas a la de la luz en fuertes campos magnéticos (esta radiación se llama sincrotrónica)— y tienen una estructura muy compacta. Para explicar la generación de energía equivalente a decenas y hasta cientos de veces la emitida por toda una galaxia (desde una región del tamaño del Sistema Solar e incluso menor), se han propuesto varias



teorías. Entre las que ha predominado la propuesta hecha hace treinta años por un astrónomo ruso y uno estadounidense. En 1964, Yakov Zeldovich y Edwin Salpeter propusieron, independientemente, que la fuente de energía de los núcleos activos de galaxias podría ser la caída de material (gas y estrellas) a un agujero negro, cuyo centro del núcleo sería de entre uno y varios millones de veces la masa del Sol. Lo que entonces pareció la idea más descabellada, ha resultado ser, a lo largo de estos últimos treinta años, la más probable y aceptada por la comunidad astronómica.

#### **Brotos intensos de formación estelar**

Por otro lado, recientemente, algunos astrónomos han retomado y desarrollado otra de las primeras teorías que surgieron para explicar los cuasares: la de explosiones casi simultáneas de estrellas muy masivas (supernovas) que funcionan como fuente de energía, provocando la aceleración de electrones. En la versión moderna de esta teoría se estudia la posibilidad de tener una gran cantidad de explosiones de este tipo, así como la evolución de los remanentes de dichas explosiones en un medio sumamente denso y un volumen muy reducido. Esta alternativa,

cuyo atractivo principal es no recurrir a objetos de existencia hipotética —los agujeros negros—, no ha resultado, sin embargo, atractiva para la mayoría de la comunidad de astrónomos, por varias razones.

Una de ellas es que, con base en lo que podemos observar en nuestra Galaxia, las explosiones de supernovas ocurren, en promedio, cada trescientos años, y lo que esta teoría requiere es, aproximadamente, una explosión diaria. Es también hipotético suponer que lo anterior puede ocurrir en el núcleo de las galaxias. Otra razón importante es que, aunque esto sucediera, la teoría excluye la posibilidad de explicar los objetos más energéticos: las radiogalaxias, los objetos BL Lac y los cuasares emisores de rayos gamma, y no puede ofrecer, por tanto, el esquema unificador del modelo del agujero negro. Particularmente, el modelo de las explosiones de supernovas no puede explicar la emisión de chorros de plasma extremadamente colimados y energéticos que se observan en muchos de los objetos mencionados; los más espectaculares son los de las radiogalaxias que se extienden a distancias de hasta miles de años luz. Los descubrimientos más recientes, al respecto, creen que es muy posible que ambas teorías, en lugar de excluyentes, sean complementarias.

## Agujeros negros supermasivos

La teoría de la relatividad general describe, en términos de la geometría del espacio-tiempo, la fuerza fundamental a gran escala en el Universo: la gravitación. La presencia de objetos masivos le da curvatura a este espacio-tiempo que se manifiesta como una “fuerza” de atracción hacia estos objetos. Esta teoría amplía la concepción newtoniana de la gravedad y muchas de las predicciones adicionales que ya han sido corroboradas; aunque no todas, como la predicción de la existencia de regiones del espacio, cuya curvatura es tan intensa que

las cierra en sí mismas, desconectándolas (desde el punto de vista de intercambio de información) del resto del Universo, y formando así un “agujero negro” en el espacio-tiempo. Como ejemplo, pensemos en los cohetes que impulsan las naves espaciales, a los cuales les deben imprimir una velocidad mínima de once kilómetros por segundo. Pero si la masa de la Tierra fuese la misma y su radio de aproximadamente medio centímetro —en lugar de poco más de seis mil kilómetros—, la velocidad de escape sería mayor a trescientos mil kilómetros por segundo, es decir, mayor que la velocidad de la luz. En ese caso, nada, ni siquiera la luz, podría escapar de la gravedad de un cuerpo con esas

características, y ésta es, precisamente, la definición de un agujero negro. El término “agujero” resulta un tanto impreciso, pues no se trata de un hoyo en el espacio, sino más bien de una enorme condensación de materia.

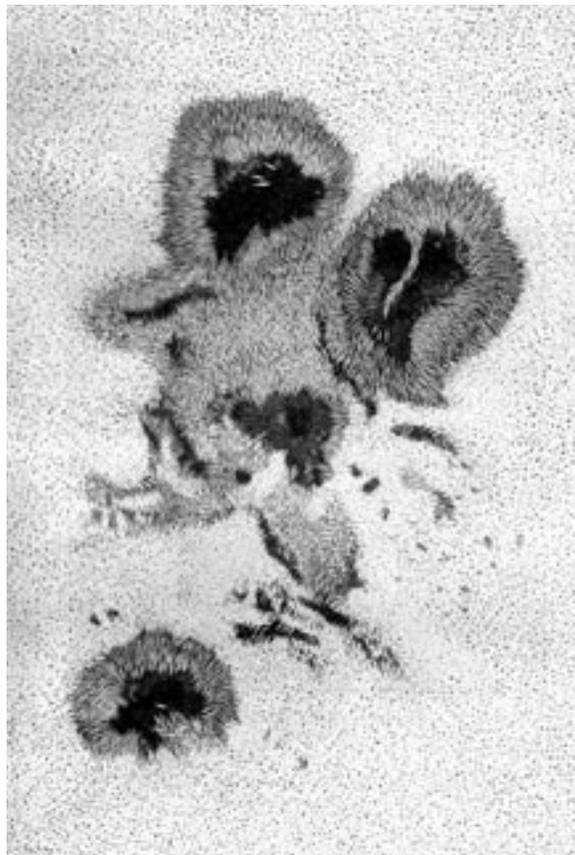
Existen fuertes argumentos, tanto teóricos como resultados de la observación, que apoyan la idea de que este tipo de objetos puede existir en el núcleo de los cuasares y otras galaxias, generando así la energía a su alrededor. El núcleo de las galaxias está conformado por cúmulos sumamente densos de estrellas que muestran —se han hecho cálculos— que pueden colapsarse por su propia atracción gravitacional hasta convertirse en un agujero negro. De ma-

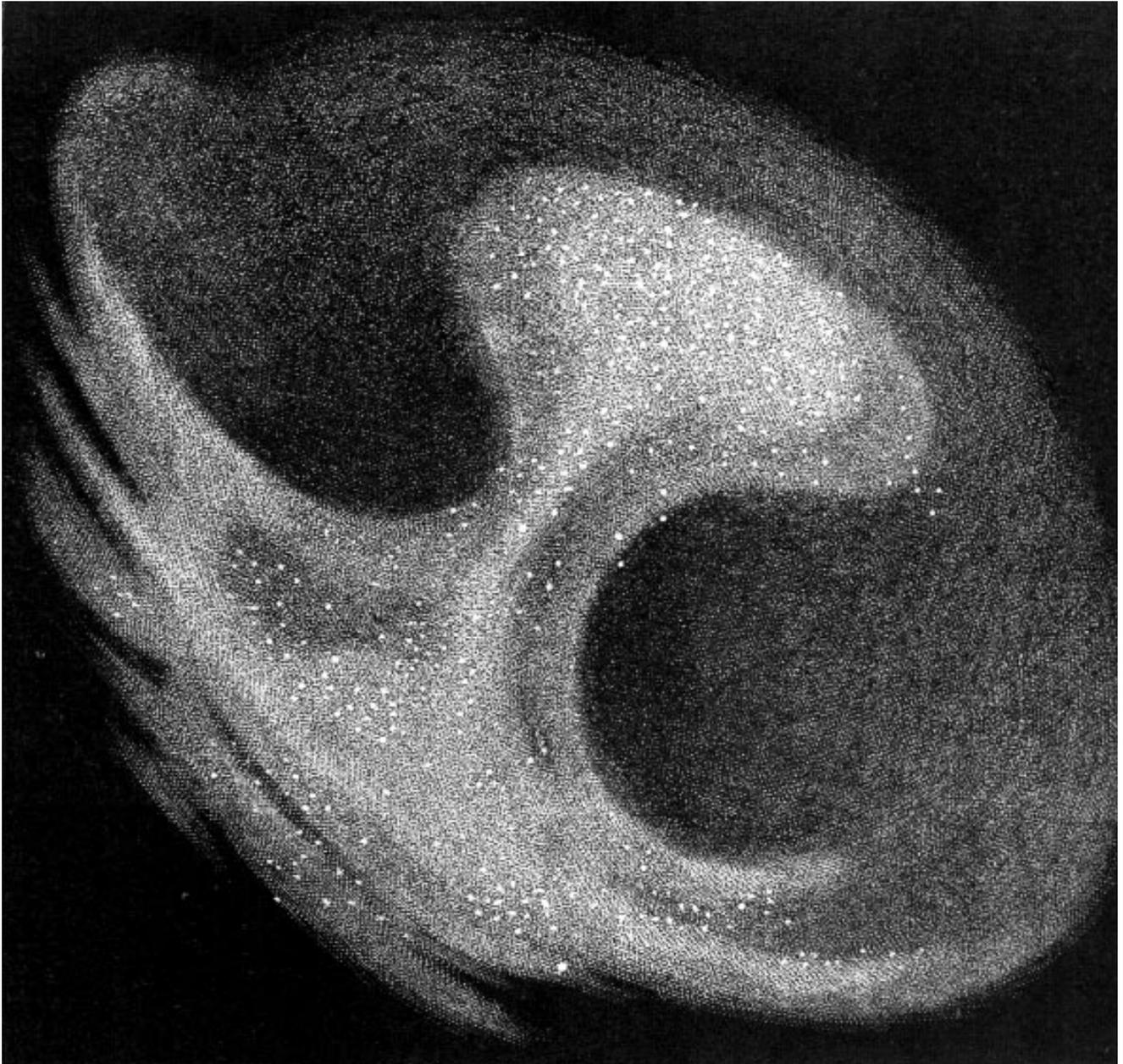
nera análoga, se piensa que las estrellas con mayor masa, al final de sus vidas —cuando no soportan su propio peso por la presión de la radiación, ya que toda su fuente de energía se ha agotado (además de que hasta ahora se desconoce alguna de materia con la suficiente “rigidez” para soportar pesos de más de cuatro masas solares)— se colapsan hasta formar agujeros negros. Sólo que, en el caso del núcleo de las galaxias, la masa del agujero negro, como resultado del colapso gravitacional de un cúmulo, sería de varios millones de masas solares. Otra teoría dice que estos agujeros negros pueden ser de origen “primordial”, es

decir, que son algo así como pedazos de la singularidad original, a partir de la cual se inició la expansión del Universo, que se quedaron sin expandir. Estos agujeros negros primordiales, al condensarse la materia alrededor de ellos, podrían servir como “semillas” para la formación posterior de galaxias, lo que ayudaría a resolver uno de los problemas más difíciles de la astrofísica: el del origen de las galaxias. En todo caso, la confirmación de la existencia de éstos es, tal vez, el tema más candente en la astrofísica moderna.

Se piensa que la generación de energía tiene lugar cuando la enorme fuerza gravitacional del agujero negro atrae material de la galaxia circundante, gas y estrellas, que por su momento angular

(o cantidad de rotación) forma una especie de remolino alrededor de éste. Las estrellas se destruyen previamente, por fuertes fuerzas de marea, al orbitar en las cercanías del agujero negro. El remolino de gas así formado se calienta por la gravedad y la fricción, radiando tanta energía como un billón de soles, cuando sus dimensiones son apenas mayores a las del Sistema Solar. La mayor parte del material atraído acaba cayendo y desapareciendo en el agujero negro, de modo que, para que se manifieste la actividad, el remolino (o disco de acreción) debe tener una fuente de suministro de gas. Así, mientras tenga suministro, el fenómeno durará (se emite energía mientras





“el monstruo tenga qué comer”). Sin embargo, parte del gas, —el más lejano al plano ecuatorial del disco (que parece una llanta, ya que no es realmente plano), logra ser acelerado en el borde interno del remolino y emitido al plano del disco en forma de chorros perpendiculares de plasma. Esto puede explicar los chorros de plasma de alta colimación, observados en cuasares y otros núcleos activos de galaxias, y en particular en las radiogalaxias.

#### **Interacciones y colisiones de galaxias**

Al preguntarse los astrónomos de dónde puede el agujero negro central obtener tanto material para “engullir” —una

vez agotado el gas normal del núcleo galáctico—, varios han afirmado que un cuasar sólo puede formarse cuando hay una colisión entre dos galaxias con una masa similar. Cada una de éstas puede poseer un agujero negro central (en cuyo caso se “funden” en uno solo y se suman sus masas), o éste se puede formar al colisionarse. En cualquiera de los casos, la colisión causa que una gran cantidad de gas fluya hacia el núcleo de la nueva galaxia, “encendiendo” un cuasar. La idea de las colisiones de galaxias no es nueva; en los setentas ya se podían explicar varias morfologías peculiares de las galaxias, como las “colas”, “puentes” y “plumas”, provocadas por fenómenos de interacción, ya sea de manera directa (fusión de galaxias) o indirecta

(fuerzas de marea por encuentros cercanos). Un ejemplo típico es el sistema conocido como “la antena” en la constelación del Cuervo. En aquella época, las simulaciones que se podían hacer de la interacción de galaxias por computadora sólo tomaban en cuenta a las estrellas, pero no al gas, lo que era una gran limitante. Cuando dos galaxias, cada una con cien billones de estrellas, chocan y se fusionan, no sucede gran cosa con las estrellas, pues las distancias interestelares son tan grandes, que la mayoría de ellas ni siquiera se tocan. Para hacer simulaciones que incluyan el gas se requieren supercomputadoras (como la Cray que adquirió recientemente la UNAM) y que han dado resultados sumamente interesantes. El gas que llena los enormes volúmenes del espacio interestelar, debido a la colisión, se aglutina en el centro de la galaxia remanente de la fusión.

Recientemente se ha descubierto que los cuasares no sólo tienen gran cantidad de gas, sino que éste se encuentra en forma molecular, es decir, a alta densidad, por lo que cuando se logra detectar la galaxia subyacente, ésta siempre presenta morfología perturbada. En este esquema, no cualquier colisión de galaxias crea un cuasar, sino sólo cuando ambas progenitoras tienen mucho gas, preferentemente molecular. La evidencia clave para confirmar esta idea vino de los descubrimientos hechos con el satélite IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*), que en 1983 detectó una serie de galaxias, cuya luminosidad en infrarrojo puede ser incluso mayor que la luminosidad visual de los cuasares (estamos hablando de longitudes de onda de doce a cien micras). Cuando dos galaxias colisionan, detonando un cuasar, éste quedará inicialmente oculto por una gran cantidad de gas y polvo que rodea al núcleo. Este polvo absorbe la enorme radiación del cuasar —por lo que es indetectable en longitudes de onda de luz visible— y se calienta e irradia gran cantidad de energía justamente en las longitudes de onda de infrarrojo. El satélite IRAS descubrió galaxias que emiten hasta 90% de su energía en infrarrojo, y varias de ellas tienen luminosidades en estas longitudes de onda de miles de millones de soles como los cuasares. El prototipo de estos objetos es la galaxia conocida como Arp 220.

Al producirse la colisión, el enorme flujo de gas genera ondas de compresión y choque que producen enormes

brotos de formación estelar. Las estrellas de mayor masa pierden gran cantidad de ésta en forma de fuertes vientos y evolucionan rápidamente hasta estallar como supernovas. Después de algunos millones de años estos acontecimientos despejan el entorno del cuasar “enterrado” y su luz empieza a verse. Incluso se cree haber encontrado objetos en esta fase transitoria, como la galaxia Mkn 231 que se encuentra entre el “cuasar infrarrojo” y el visible, y a pesar de emitir 90% de su energía en el infrarrojo, tiene las características claras de cuasar visible, su morfología refleja indudablemente una colisión de galaxias, y además se le ha detectado una enorme cantidad de gas molecular, requisito indispensable para detonar un cuasar.



Hay que decir que, como siempre, no todos los astrónomos que trabajan en este tema están de acuerdo con tales ideas. Algunos piensan que la interacción de galaxias puede ser una condición suficiente, pero no obligatoria. Recientemente se han logrado obtener imágenes de varios cuasares con los telescopios óptico-infrarrojos Keck y el franco-canadiense, en Hawái. En alrededor de 90% de los casos se ha detectado una galaxia subyacente con morfología de interacción. Sin embargo, estas observaciones sólo han sido posibles de los cuasares más brillantes. Aunque algunos astrónomos piensan que las galaxias superluminosas detectadas en el infrarrojo

por el IRAS son “protocuasares”, se argumenta que la colisión puede generar solamente un gigantesco brote de formación estelar en el centro, para lo cual existe una prueba crucial que determina si las galaxias infrarrojas son cuasares disfrazados (o protocuasares) que en ese caso tienen la misma distribución en su desplazamiento al rojo que los cuasares.

Se sabe que la enorme mayoría de los cuasares tiene corrimientos al rojo entre  $z = 2$  y  $z = 3$ . Cuando la luz de esos objetos fue emitida hace miles de millones de años —que es lo que ha tardado su viaje por el espacio hasta llegar a nosotros—, el Universo era mucho más joven y estaba menos extendido, por tanto, la densidad de galaxias, así como la posibilidad de colisión entre ellas era mucho mayor. Esto explicaría el que ya no se formen cuasares (no hay cuasares cercanos) y que las galaxias actualmente no tengan tanto gas como cuando acababan de formarse, pues fue “usado” para formar estrellas.

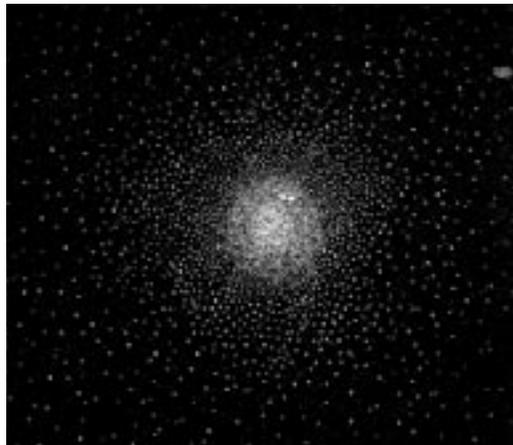
Lo principal, entonces, es averiguar si la distribución de los corrimientos al rojo de las galaxias infrarrojas es la misma que la de los cuasares, para lo cual tendremos que esperar un mejor telescopio que nos permita ver galaxias infrarrojas más lejanas. Quizá será posible con el telescopio SIRTFF (*Space Infrared Telescope Facility*) que se espera a principios de este siglo.

La curiosidad por saber qué tipo de procesos físicos dominan la emisión observada en distintas frecuencias de los diversos núcleos activos de galaxias (incluidos los cuasares) sigue presente. La hipótesis más aceptada es que la energía de este proceso (de origen gravitacional) dominará la emisión, dependiendo de cuánto material tenga el agujero negro a su disposición “para engullir”. Si el “alimento del monstruo” es menor, la emisión de origen gravitacional puede ser comparable a la emisión de estrellas masivas y supernovas de un brote de formación estelar circumnuclear, e incluso, a los núcleos menos energéticos, las estrellas, gas y polvo de toda la galaxia circundante. Uno de los grandes retos de este campo es poder desentrañar el origen de todas las contribuciones a la emisión de estos objetos. Hay quienes piensan que todas las galaxias tienen un agujero negro en su núcleo, incluida la nuestra, la Vía Láctea. El “monstruo” puede, por tanto, haber estado activo en el pasado y estar muerto o

moribundo por “inanición” en el presente. En el centro de nuestra Galaxia existen ciertas evidencias de actividad nuclear, aunque son sólo indirectas y no hay pruebas, por lo que es muy difícil detectar esta actividad. En los objetos más activos, lo difícil es detectar la galaxia circundante, aunque recientemente logramos ver, por primera vez, el objeto tipo BL Lac: “el Lagarto” OJ287 (esta imagen se obtuvo en el observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, Baja California). En este caso se estudió también su velocidad y se encontró evidencia de interacción de galaxias, como en los cuasares.

### Faros que alumbran el pasado

Por último, hay que decir que los cuasares son una especie de faros que iluminan el pasado. Recordemos el ejemplo con el que iniciamos este texto: el cuasar 3C273, cuya luz tarda 2 500 000 000 de años en llegar a la Tierra (la mitad de la edad del Sol), es el más cercano de todos los cuasares. Tal vez algunos de esos objetos sean ahora galaxias con soles y planetas en los que hay astrónomos que ven la Vía Láctea como fue hace cientos de miles de años, quizá como cuasar. En todo caso, el estudio de estos objetos es esencial para la cosmología, para el estudio del origen y la evolución del Universo. 🐼



**Deborah Dultzin**  
Instituto de Astronomía,  
Universidad Nacional Autónoma de México.

#### IMÁGENES

Dibujos realizados con base en las observaciones de diferentes astrónomos, tomados de Amédée Guillemin, *Le Ciel. Notions d'Astronomie*, L. Hachette, París, 1870. P. 66: Vía Láctea Austral; p. 67: Vía Láctea Boreal; p. 68: granulaciones de la superficie del Sol, según W. Huggins; p. 69: nebulosa de l'Écu de Sobieski, se-

gún J. Herschel; p. 70: manchas solares; estructura granulada de la fotosfera y hojas de sauce en las penumbras, con base en Nosmyth; p. 71: *Dumb bell*, nebulosa del zorro, según Lord Rosse; p. 72: Nebulosa del Toro (*Crab nebula*) según Lord Rosse; p. 73: Amas del Tucán, de acuerdo con J. Herschel.