

LOS ENIGMÁTICOS CUASARES

Los cuasares son objetos celestes que por más de treinta años han cautivado e intrigado a los astrónomos. El primero de estos objetos se descubrió en 1960 pero fue hasta 1963 cuando los astrónomos comprendieron (o creyeron comprender) lo que estaban viendo. Aunque el objeto parecía ser una débil estrellita azul, desde un principio se sospechó que no se trataba de ninguna estrella ordinaria ya que inicialmente fue detectado por su emisión de radiofrecuencia y sólo después se identificó esta emisión con un objeto visible. Las estrellas no emiten con esa intensidad en radiofrecuencia.

Una de las técnicas más utilizadas en astronomía para analizar la luz de los objetos es la espectroscopía, 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 claro de inmediato que, a pesar de su apariencia de estrellita azul, no se parecía a ninguna estrella por sus características espectrales (que reflejan básicamente temperatura). De hecho, no se parecía a ningún cuerpo celeste conocido hasta entonces. Maarten 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. Pero las longitudes de onda en las que aparecía este patrón habían sido desplazadas sistemáticamente hacia el lado rojo del espectro (aparecía 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. Al poco tiempo se logró una identificación similar para otros objetos.

Después de descartar otras posibles causas de ese corrimiento hacia el rojo, se llegó a la interpretación aceptada hasta hoy por la gran mayoría de los astrónomos: el corrimiento hacia el rojo se debe a la expansión del Universo. A causa de esta expansión todas las galaxias se alejan unas de otras. Ésta es una de las predic-

ciones más importantes que se desprenden de la teoría de la relatividad general, formulada por Albert Einstein alrededor de 1915; tal predicción fue comprobada por Edwin Hubble unos años más tarde. Además, Hubble logró establecer una relación entre la distancia a la que se encuentra una galaxia —de nosotros— y su aparente velocidad de alejamiento debida a la expansión del Universo. Esta correlación se conoce como la ley de Hubble y establece que la velocidad de recesión (o alejamiento) es mayor cuanto más lejos se encuentra una galaxia, en proporción directa a la distancia de esta última. El corrimiento hacia el rojo de los patrones espectrales ya se había detectado (aunque nunca en la forma tan drástica como apareció en los cuasares) y, siendo éste una medida de la velocidad de recesión según la ley de Hubble, se usaba para determinar la distancia de galaxias lejanas. Al medir el corrimiento espectral del cuasar conocido como 3C273 se obtuvo un valor de 15.8%. El corrimiento hacia el rojo, que se designa con la letra z , se define como la diferencia entre la longitud de onda de la luz al ser emitida y la longitud de onda al ser observada, dividida entre ésta; para 3C273 el valor es $z = 0.158$. Aplicando la ley de Hubble, se obtiene una distancia tal que la luz debe viajar 2000 millones de años para llegar a nosotros desde este objeto (esto se expresa diciendo que el objeto se encuentra a 2000 millones de años luz de distancia). Estaba claro entonces: no se trataba de una estrella sino de un objeto fuera de nuestra galaxia y el más lejano de los conocidos hasta entonces. El nombre de *cuasar* proviene de las siglas en inglés de *objeto cuasi estelar*. Hoy en día se conocen más de dos mil cuasares (15 llevan el nombre del observatorio mexicano de Tonanzintla) y el 3C273 es... ¡el más cercano! El más lejano detectado hasta ahora tiene su espectro corrido hacia el rojo en casi 500% ($z = 4.897$), lo que implica una velocidad de recesión muy cercana a la de la luz (300 000 km/seg), que es la velocidad límite en la naturaleza para el movimiento de la materia y la energía. La velocidad de recesión de este cuasar lo sitúa en los confines del Universo observable.

El siguiente hallazgo sorprendente fue la variabilidad en el brillo de ciertos cuasares. 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 25 millones de kilómetros (dos veces el tamaño del sistema solar). Es decir, algunos cuasares producen mucho más energía que una galaxia normal —con sus cientos de miles de millones de estrellas— en una región tan pequeña como el sistema solar.

En los últimos veinte años se ha realizado un intenso trabajo para, por un lado, observar los cuasares en todas las frecuencias posibles, desde las radiofrecuencias (radiación de baja energía) hasta los rayos gama (la radiación más energética), lo que ha sido posible gracias al gran avance de la tecnología astronómica de los observatorios espaciales. Y, por otro lado, para formular teorías que puedan explicar los fenómenos físicos que ocurren en los cuasares, muy especialmente la fuente de tan colosal energía. A partir de las detecciones más recientes de cuasares en rayos gama se sabe que, al menos en estos objetos, el origen de la energía no es, definitivamente, estelar. Además, los datos de variabilidad en las frecuencias de rayos x ponen límites aún más severos al tamaño de donde proviene la emisión de esta energía.

Algo que ha quedado 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 emergido el hecho de que fenómenos muy similares ocurren en los núcleos de varios tipos de galaxias: en las llamadas radiogalaxias, en unos objetos conocidos como objetos tipo BL Lacertae (“primos hermanos” de los cuasares), y en las galaxias conocidas como galaxias Seyfert (por su descubridor). Los núcleos de todos estos objetos son muy parecidos a los cuasares, aunque la potencia emitida, y algunas otras características, varían de un tipo a otro. Asimismo, se han logrado detectar las galaxias que rodean a los cuasares que están en el centro de ellas; de modo que, hablando genéricamente, todos estos objetos se agrupan bajo el nombre común de *núcleos activos de galaxias*.

Las tres propiedades comunes más importantes de todos los núcleos activos de galaxias son: altísima luminosidad, radiación de electrones ultrarrelativistas —es decir, acelerados a velocidades cercanas a la de la luz en fuertes campos magnéticos (esta radiación se llama *sin-crotrónica*)—, y 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 (y aun menor), se han propuesto varias teorías. No tenemos la posibilidad aquí de analizar los pros y contras de cada una, basta decir que la mayoría ha sido desechada por diversas razones. La que ha predominado es la idea propuesta

hace treinta años por un astrónomo ruso y por uno norteamericano. En 1964, Yakov Zeldovich y Edwin Salpeter propusieron, cada uno por su lado, que la fuente de energía de los núcleos activos de galaxias podría deberse a la caída de material (gas y estrellas) a un agujero negro de entre uno y varios millones de veces la masa del Sol, situado en el centro del núcleo. Lo que pareció en un principio la idea más descabellada ha resultado ser, a lo largo de estos últimos treinta años, la más probable y la más aceptada por la comunidad astronómica.

En la ciencia nada es dogma de fe, por lo que hay quienes sostienen ideas alternativas. Por un lado, hay quienes piensan que tal vez los cuasares y objetos relacionados no están realmente a las distancias que implica el corrimiento hacia el rojo debido a la expansión del Universo. Si los cuasares estuviesen cerca y si, por ejemplo, fuesen objetos de nuestra galaxia, su luminosidad real (intrínseca), deducida a partir de la observada (aparente), sería mucho menor y, consecuentemente, el requerimiento energético también. Si esto fuera así, entonces tendríamos que buscar otra explicación del corrimiento hacia el rojo... pero no la hay. La única alternativa podría ser el corrimiento hacia el rojo producido por la fuerza de gravedad que, como demostró Einstein, actúa también sobre la luz; sin embargo se han hecho estudios que demuestran que este efecto no es el predominante, ya que si lo fuera habría una contradicción con lo observado respecto a los cuasares. Por otro lado, hay evidencias de objetos aparentemente conectados entre sí, que tienen corrimientos muy disímiles. Dicho de otra manera: parecen estar en contacto físico pero resultan estar a distancias muy diferentes. Podrían deberse a efectos de proyecciones casuales en el plano del cielo, aunque la probabilidad de que esto suceda es muy baja. O... en fin, eso es parte del chiste, no todo tiene una respuesta. Uno de los argumentos más fuertes en favor de las distancias cosmológicas de los cuasares es el efecto conocido como *lentes gravitacionales*. Este efecto consiste en la distorsión de las trayectorias de los rayos luminosos provenientes de los cuasares, producida por la atracción gravitacional de galaxias que se interponen entre un cuasar y nosotros. Se ha observado que estas distorsiones producen imágenes múltiples (como cuando “vemos bizco”) o alargadas como enormes arcos en el cielo. Para que esto suceda los cuasares deben estar mucho más lejos que las galaxias que producen el efecto de lente gravitacional, distorsionando la luz de éstos.

Por otro lado, algunos astrónomos han revivido y desarrollado recientemente una de las primeras teorías que surgieron para explicar los cuasares: la de las explosiones casi simultáneas de estrellas muy masivas (supernovas) como fuente de energía y de aceleración de electrones. En la versión moderna de esta teoría se estudia la posibilidad de que en un medio sumamente denso y en un volumen muy reducido tenga lugar una gran can-

tividad de explosiones de este tipo, así como la evolución de los remanentes de dichas explosiones. Sin embargo, esta alternativa, cuyo atractivo principal es no recurrir a objetos cuya existencia es hipotética —los agujeros negros—, no ha resultado atractiva para la mayor parte de la comunidad por varias razones. Una de ellas es que las explosiones de supernovas que observamos en nuestra galaxia ocurren, en promedio, una vez cada 300 años, y lo que esta teoría requiere es, aproximadamente, una explosión diaria. También resulta hipotético suponer que esto puede ocurrir en los núcleos de las galaxias. Otra razón importante es que, aun si tales explosiones ocurren, la

teoría en cuestión excluye la posibilidad de explicar los objetos más energéticos como las radiogalaxias, los objetos BL Lac y los cuasares emisores de rayos gama; no ofrece, por lo tanto, el esquema unificador que se desprende del modelo del agujero negro. En particular, el modelo de explosiones de supernovas no puede explicar la emisión de chorros de plasma extremadamente colimados y energéticos que se observan en muchos de estos objetos; los más espectaculares son los de las radiogalaxias que se extienden a distancias de hasta miles de años luz. No obstante, a la luz de los descubrimientos más recientes que se mencionan más adelante, veremos que es muy posible que ambas teorías sean complementarias en lugar de ser excluyentes.

Veamos con más detalle el modelo del agujero negro central. La teoría de la relatividad general describe la fuerza fundamental a gran escala en el Universo, la gravitación, en términos de la geometría del espacio-tiempo. La presencia de objetos masivos le da curvatura a este espacio-tiempo; esa curvatura se manifiesta como una fuerza de atracción hacia esos objetos masivos. Esta teoría amplía la concepción newtoniana de la gravedad y muchas de las predicciones adicionales han sido ya corroboradas. Sin embargo otras todavía no, como la que plantea la posibilidad de que existan regiones del espacio cuya curvatura es tan intensa que las cierra sobre sí mismas, desconectándolas (desde el punto de vista de intercambio de información) del resto del Universo, formándose



Una imagen del cuasar 3C66A. En la fotografía aparecen también algunas estrellas mucho más cercanas a nosotros pero que se encuentran en la misma dirección que el cuasar. La imagen fue tomada con el telescopio de 2.1 m del Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, Baja California.

un agujero negro en el espacio-tiempo. Podemos entender esta idea en el marco de la física clásica: la masa y el radio de un cuerpo esférico están relacionados por la expresión: $R = 2GM/v^2$, en la que R y M designan el radio y la masa, respectivamente, G es la constante de gravitación universal y v es la *velocidad de escape*, es decir, la velocidad que debe imprimirse a un objeto para que se libere (escape) de la atracción gravitacional del cuerpo. Como ejemplo, pensemos en los cohetes que impulsan a las naves espaciales. Estos cohetes deben imprimir una velocidad mínima de 11 kilómetros por segundo a dichas naves para que éstas puedan escapar de la atracción gravitacional terrestre y salir al espacio, ya que si anotamos la masa y el radio de la Tierra en la expresión de arriba obtenemos precisamente 11 kilómetros por segundo. Pero si la masa de la Tierra fuese la misma y su radio aproximadamente medio centímetro (en lugar de poco más de seis mil kilómetros), la velocidad de escape que nos daría la expresión de arriba 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 a la acción de la gravedad de un cuerpo con esas características, y ésta es, precisamente, la definición de un *agujero negro*. Como se ve, la palabra *agujero* resulta un tanto imprecisa pues no se trata de un agujero en el espacio, sino más bien de una enorme condensación de materia.

Veamos ahora por qué se cree que este tipo de objetos pueden existir en los núcleos de los cuasares y en al-

gunas galaxias, y cómo se genera la energía en su entorno. En los núcleos de las galaxias existen cúmulos sumamente densos de estrellas; se han realizado cálculos que muestran que estos cúmulos pueden colapsarse bajo la acción de su propia atracción gravitacional hasta convertirse en un agujero negro. De manera análoga, se piensa que las estrellas más masivas, al final de sus vidas, al no tener ya soporte para su propio peso por la presión de la radiación (la estrella ha agotado sus fuentes de energía), ni conocerse estructura alguna de la materia con la suficiente "rigidez" para soportar pesos de más de unas cuatro masas solares, se colapsan bajo la acción de su autogravedad hasta formar agujeros negros. Sólo que, en el caso de los núcleos de las galaxias arriba mencionados, la masa del agujero negro resultante del colapso gravitacional de un cúmulo sería de varios millones de masas solares. Otra teoría sostiene que estos agujeros negros pueden ser de origen *primordial*, es decir, 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 podrían servir de "semillas" para la formación posterior de galaxias por condensación de materia alrededor de ellos, 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 los agujeros negros es probablemente el tema más candente de la astrofísica moderna.

El modelo de generación de energía puede resumirse de la siguiente manera: 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) forman una especie de remolino o disco alrededor del agujero negro. Las estrellas se destruyen previamente por la acción de potentes fuerzas de marea al orbitar en las cercanías del agujero negro. El disco de gas así formado se calienta por la gravedad y la fricción, pudiendo radiar tanta energía como un billón de soles aunque sus dimensiones son apenas mayores que las del sistema solar. La mayor parte del material acaba cayendo y desapareciendo en el agujero negro de modo que, para que se manifieste la actividad, el disco debe tener una fuente de suministro de gas; mientras dure el suministro, durará el fenómeno. En la jerga profesional se habla de que se emite energía cuando —y mientras— "el monstruo tenga qué comer". Sin embargo, parte del gas, el más lejano al plano ecuatorial del disco, logra ser acelerado en el borde interno del remolino y emitido en forma de chorros de plasma perpendiculares al plano del disco. Este escenario puede explicar, además, los chorros de plasma de alta colimación observados en cuasares y otros núcleos activos de galaxias, en particular las radiogalaxias.

Al preguntarse los astrónomos de dónde obtiene el agujero negro central tanto material para "engullir" —una vez agotado el gas normal del núcleo galáctico—, al-

gunos han llevado este modelo más lejos al afirmar que un cuasar sólo puede formarse cuando ocurre una colisión de dos galaxias de masa similar. Cada una de estas galaxias puede poseer ya un agujero negro central (en cuyo caso se "funden" en uno solo con la suma de las masas de cada uno), o éste puede formarse en el proceso de la colisión. En cualesquiera de los casos, la colisión provoca 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; ya en los años setentas se podía explicar que varias morfologías peculiares como *colas*, *puentes* y *plumas* en galaxias se debían a fenómenos de interacción entre ellas, ya fuera 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 de la interacción de galaxias que era posible realizar en las computadoras sólo tomaban en cuenta las estrellas, no el gas, lo que era una gran limitante. Cuando dos galaxias, cada una con 100 mil millones de estrellas, chocan y se fusionan, no sucede gran cosa con las estrellas pues las distancias interestelares son tan enormes que la mayoría de las estrellas ni se toca entre sí. Para hacer simulaciones que incluyan el gas se requieren supercomputadoras (como la Cray que adquirió recientemente la UNAM); éstas han arrojado resultados sumamente interesantes. Debido a la colisión, el gas que llena los enormes volúmenes del espacio interestelar 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 lo tienen en forma molecular, es decir, de alta densidad. En este esquema, no cualquier colisión de galaxias crea un cuasar sino sólo aquellas en que ambas progenitoras tengan mucho gas, preferentemente molecular. Así, el cuasar sería la manifestación más extrema del proceso de fusión de galaxias. 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 el espectro infrarrojo (estamos hablando de longitudes de onda de 12 a 100 micras) es tan grande como la luminosidad visual de los cuasares. Cuando dos galaxias se colisionan para detonar un cuasar, éste inicialmente estará oculto en una gran cantidad de gas y polvo que rodea al núcleo. El polvo absorbe la enorme radiación del cuasar, lo que lo hace indetectable en longitudes de onda de luz visible. Pero el polvo, al absorber esta radiación, se calienta y radia gran cantidad de energía justamente en las longitudes de onda del espectro infrarrojo que mencionamos arriba. El satélite IRAS descubrió galaxias que emiten hasta el 90% de su energía en el infrarrojo, y varias de ellas tienen luminosidades en estas longitudes de onda de miles de millones de soles, es decir, como los cuasares. Más aún, al examinar estas galaxias con imágenes en luz visible, se encuentra que *todas* muestran



Par de galaxias conocido como "Kar 29" de morfología mixta (una galaxia elíptica y la otra espiral). El estudio de este sistema realizado recientemente (Marziani, Keel, Dultzin-Hacyan y Sulentic, 1994 *Astrophys. Journal*, en prensa) muestra que la galaxia elíptica atravesó el disco de la espiral desencadenando actividad nuclear e intensos brotes de formación estelar en la espiral (la galaxia de abajo). En la imagen, tomada con el telescopio de 2.1 m del Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, se observa la distorsión del disco de la galaxia espiral.

morfologías de galaxias en colisión. El prototipo de estos objetos es la galaxia conocida como Arp 220.

Al producirse la colisión, el enorme flujo de gas hacia el núcleo genera ondas de compresión y de choque que producen enormes brotes de formación estelar. Las estrellas más masivas del brote pierden gran cantidad de masa en forma de fuertes vientos y evolucionan rápidamente hasta estallar como supernovas. Después de algunos millones de años, estos eventos despejan el entorno del cuasar "enterrado" y la luz de éste empieza a verse. De hecho, también se cree haber encontrado objetos en esta fase transitoria. La galaxia Markarian 231 es el prototipo de transición entre *cuasar infrarrojo* y *cuasar visible*. Emite el 90% de su energía en el infrarrojo, a pesar de que ya tiene claramente características de *cuasar visible* y su morfología refleja indudablemente colisión de galaxias; 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 estas ideas; algunos piensan que la interacción de galaxias puede ser una condición suficiente pero no necesaria para formar cuasares, es decir, que no todos los cuasares se for-

man así. Recientemente se ha logrado obtener imágenes muy profundas de varios cuasares con el telescopio franco-canadiense en Hawaii y en aproximadamente el noventa por ciento de los casos se ha detectado una galaxia subyacente con morfología de interacción. Sin embargo, estas observaciones sólo han sido posibles en los casos de los cuasares más brillantes. Por otro lado, algunos astrónomos piensan que si bien todas las galaxias superluminosas detectadas en el infrarrojo por IRAS parecen ser producto de colisiones, no necesariamente todas son *protocuasares*. Se argumenta que la colisión puede generar sólo un brote gigantesco de formación estelar en el centro y éste puede explicar las propiedades observadas. Para dilucidar este punto existe una prueba crucial que deberá hacerse: si las galaxias infrarrojas son cuasares disfrazados (o *protocuasares*) deben tener la misma distribución en su corrimiento hacia el rojo que los cuasares.

Se sabe que la gran mayoría de los cuasares tienen corrimientos hacia el rojo entre $z = 2$ y $z = 3$. Es importante señalar que cuando la luz de esos objetos fue emitida hace miles de millones de años —que es lo que ha tardado en su viaje por el espacio hasta llegar a nosotros—, el Universo era mucho más joven y estaba menos expandido. Por lo tanto, la densidad de galaxias en un volumen dado del espacio era mucho mayor y, consecuentemente, la probabilidad de colisión entre ellas era también mayor. Esto explicaría el hecho de 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 lo han "usado" para formar estrellas. El punto fundamental es averiguar si la distribución de corrimientos hacia el rojo de las galaxias infrarrojas es la misma que la de los cuasares. Pero para ello debemos esperar a tener un telescopio infrarrojo que nos permita ver galaxias infrarrojas más lejanas. Esto será factible a principios del próximo siglo, cuando se espera lanzar el telescopio SIRT (Space Infrared Telescope Facility).

Por ahora, lo que la mayoría de los astrónomos trata de averiguar es qué tipo de procesos físicos domina la emisión observada en distintas frecuencias de los diversos núcleos activos de galaxias (incluidos los cuasares). La hipótesis de trabajo mayoritariamente admitida es que, dependiendo de cuánto material tenga a su disposición "para engullir" el agujero negro, la energía de este proceso (energía de origen gravitacional) dominará la emisión de radiación —como probablemente ocurre en las galaxias con núcleos activos más energéticos— o será opacada por la emisión de estrellas masivas y supernovas de un brote de formación estelar circunuclear o, incluso, en el caso de los núcleos menos energéticos, será opacada por la emisión de las estrellas, el gas y el polvo del resto de la galaxia. En la mayoría de los casos, observamos una mezcla de estos procesos con contribuciones distintas en diferentes rangos de frecuencias. Uno de los grandes retos de este campo es el poder desentrañar el origen de todas las contribuciones a la emisión de estos objetos. ■