

## LA EVOLUCIÓN DE LAS GALAXIAS<sup>1</sup>

**Pere Planesas Bigas**

*Observatorio Astronómico Nacional (OAN)*

Instituto Geográfico Nacional (IGN)

Reimpresión de un artículo publicado en la edición de 2002 del Anuario del Observatorio Astronómico publicado anualmente por el Instituto Geográfico Nacional de España.

### Abstract

Knowledge of the evolution of galaxies is required to undertake the study of the evolution of the Universe. However, the early life of the galaxies can only be traced by the observation of the most distant ones, often associated with a quasar. A deeper insight is obtained when a gravitational lens lies between the observer and the far-off galaxy. New telescopes and techniques provide essential data to understand galaxy evolution.

### Resumen

Estudiar la vida del Universo requiere conocer la de las galaxias, cuya infancia y juventud sólo puede ser desentrañada observando las más lejanas, a menudo identificadas por su asociación con cuásares. Una ayuda inestimable se obtiene cuando una lente gravitatoria se interpone entre la galaxia y nosotros. Paulatinamente, con nuevos telescopios y nuevas técnicas, se va conociendo la evolución de las galaxias.

### La era extragaláctica

La astronomía extragaláctica, la que estudia las galaxias, ha sido durante décadas un campo de investigación *prometedor*, a la espera de instrumentos capaces de estudiarlas en todos sus aspectos y en todas sus edades. Por fin, estos instrumentos están llegando (HST, Keck, VLT) o se están construyendo (VLTI, GTC, ALMA, Herschel). Sabemos de las galaxias mucho más que hace tan sólo treinta años, época en que se empezó a considerar la cuestión de su evolución, o sea de su vida, un conocimiento imprescindible para comprender el tipo de universo en el que vivimos. Pero seguimos teniendo la sensación de que queda mucho por descubrir, por aprender. Y cada paso cuesta mucho esfuerzo, pues a menudo obliga a utilizar los instrumentos al límite de sus posibilidades.

---

<sup>1</sup>Artículo basado en sendas conferencias del autor dadas a finales de 2000 en el Planetario de Madrid y en la Agrupació Astronòmica d'Osona.

## Un universo de galaxias

Si hace cien años la visión del *cielo estrellado* nos hacía concebir el universo como una miríada de estrellas, ahora consideramos que las galaxias son los ladrillos de los que está hecho el universo tal como lo conocemos.

Cuando se fotografía el cielo durante muchas horas con un gran telescopio apuntando a una zona donde no hay estrellas lo que aparece es un *cielo galaxiado*: casi todo lo que se ve son galaxias, miles de ellas, que aparecen como copos de nieve en una ventisca. Se estima que hay miles de millones de ellas, tantas galaxias en el universo como estrellas en una galaxia: si las repartiéramos nos tocaría a razón de unas diez por cabeza.

## Cúmulos y radiogalaxias

Hasta principios de la década de 1960 sólo era posible estudiar en cierto detalle el universo más cercano, correspondiente al último 10% de su vida. Los millones de galaxias que contiene este universo cercano están casi siempre en grupos: pequeños, de unas decenas de galaxias (35 en el último censo del Grupo Local, en que se encuentra la Vía Láctea), o grandes, quizás con miles de ellas y que denominamos *cúmulos* de galaxias. Estos están distribuidos homogéneamente en el espacio. Las galaxias encontradas en ellos parecen encajar fácilmente en la clasificación morfológica establecida por Hubble hacia el año 1926: las hay espirales, elípticas e irregulares.

Unos nuevos instrumentos de aquella época, los radiotelescopios, mostraban la existencia de algunas galaxias especiales, que emiten gran cantidad de energía en forma de ondas de radio, tanta como en forma de luz visible. La primera fue Cygnus A (en 1953). De hecho, el objeto más distante conocido en esa época era una de tales *radiogalaxias*, denominada 3C295 y cuyo corrimiento al rojo<sup>2</sup> era  $z = 0,461$ .

Precisamente el interés en conocer qué tipo de astros eran los capaces de generar tal cantidad de ondas de radio dio lugar por aquel entonces al descubrimiento de un nuevo tipo de astro inesperado. Un tipo de astro que, por primera vez, permitiría otear en épocas remotas del Universo.

## Los cuásares

Los radioastrónomos habían descubierto fuentes de intensa emisión radio en todas las direcciones del cielo, pero no conseguían identificar

<sup>2</sup>Es una medida del cambio relativo de la longitud de onda de las rayas espectrales observadas respecto de la longitud de onda medida en laboratorio, cambio que se puede traducir en una distancia o un tiempo pasado, adoptando un modelo particular de Universo. A mayor corrimiento al rojo corresponden una mayor distancia y una mayor antigüedad.

muchas de ellas con ningún tipo de astro conocido hasta entonces: estrellas, nebulosas o galaxias. Al mismo tiempo, con los telescopios convencionales los astrónomos obtenían espectros<sup>1</sup> desconcertantes para algunos astros.

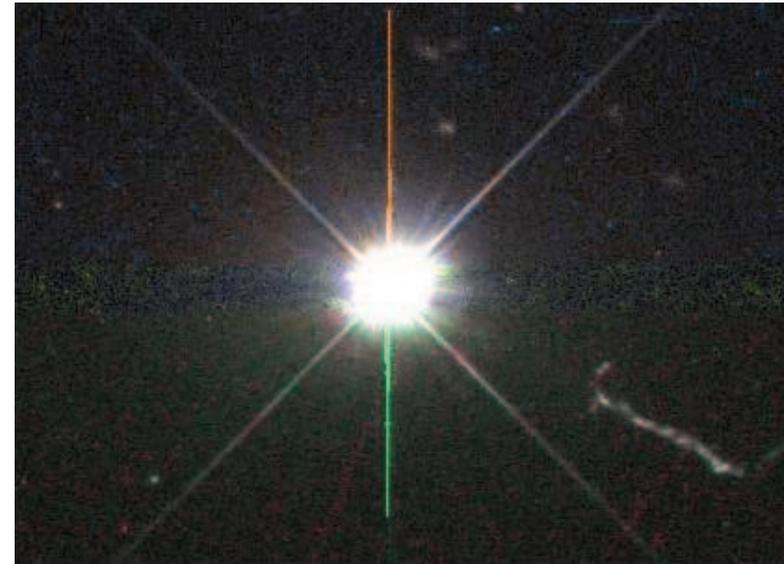


Figura 1: Imagen óptica de 3C273 obtenida con el Telescopio Espacial Hubble (HST). Además de la imagen “cuasi-estelar” (expresión de la que proviene la palabra *cuásar*), se aprecia hacia la derecha un chorro de gas luminoso bien colimado con una longitud de cien mil años luz. Se trata del primer cuásar descubierto (1963) y es el más cercano ( $z = 0,158$ ) y más brillante (magnitud 12,86) visto desde nuestra galaxia. Este cuásar fue inicialmente detectado como una intensa radiofuente situada en la constelación de Virgo. Cortesía de John Bahcall y NASA/STScI.

En 1963 Maarten Schmidt consiguió explicar uno de ellos, al comprender que el espectro de una cierta radiogalaxia con apariencia estelar correspondía a un astro muy lejano y, consecuentemente, mucho más brillante que una galaxia entera. Se trataba del primer cuásar (3C273, Figura 1) astro que está mil veces más lejos que la galaxia de Andrómeda y es unas cien veces más luminoso que ésta, o sea que una galaxia entera.

<sup>1</sup>Los espectros se obtienen por análisis de la luz del astro. En ellos hay rayas espectrales de emisión y de absorción, que vienen a ser como un código de barras que permite conocer de qué están hechos y la velocidad a la que se mueven los astros que las emiten.

El aspecto estelar y la rápida variación de su luminosidad, en escalas de meses y también de horas, tanto en luz como en radioondas, indica bien que se trata de astros mucho menores que una galaxia, o bien que se trata de un fenómeno que ocurre en una región muy pequeña de una galaxia, una región del tamaño de un sistema solar. Además se plantean otras cuestiones: ¿cómo se genera tanta energía en tan poco espacio?, ¿cuánto dura tan extraordinaria generación de energía?, ¿es algo que se produce al nacer las galaxias?.

Pronto los cuásares batieron el récord de distancia y lo siguen manteniendo ahora (J1030+054, a  $z = 6,28$ ), habiendo sido superados ocasionalmente por algunas galaxias muy primitivas. Se han catalogado unos diez mil cuásares, pero en exploraciones en curso (como la 2dF y la Sloan) se espera catalogar muchos más cuásares nuevos. En el entorno de nuestra galaxia hay muy pocos: sólo hay un cuásar por cada millón de galaxias, pero hubo una época en que eran decenas de veces más numerosos.

Resulta frustrante que cuando se descubre un astro lejano, que puede permitirnos sondear el universo joven, dicho astro no se parezca en nada a los que nos rodean. Los cuásares resultan ser unos astros muy extremos en todos los sentidos: son los más luminosos, se encuentran entre los más distantes, son muy compactos comparados con una galaxia, ...

Todo ello plantea inmediatamente una serie de cuestiones: ¿dónde nacen?, ¿porqué son mucho más brillantes que una galaxia?, ¿porqué antes eran mucho más abundantes que ahora?.

En nuestro interés por conocer la infancia y juventud de las galaxias aparentemente hemos topado con una vía muerta. Habrá que buscar otro camino.

### Las galaxias infrarrojas

Veinte años después, a principios de la década de 1980, los telescopios no permitían alcanzar más allá de lo que corresponde a la segunda mitad de la vida del universo. El universo no parece haber cambiado mucho desde entonces, sólo se ha expandido. A lo largo de tal década aparecieron nuevos telescopios (llamados entonces de “nueva tecnología”) y nuevos detectores (electrónicos: los detectores CCD) que permitieron ver astros más lejanos o ver más en detalle los astros ya conocidos, e incluso medirlos con mayor precisión fotométrica.

Tan importante como esto fue que se empezó a mirar el universo desde una nueva ventana: se utilizaron, desde alta montaña y con mayor éxito desde el espacio, telescopios y detectores que nos mostraban el Universo en infrarrojo.

De igual manera que cuando veinte años antes se empezó a observar el cielo con radiotelescopios se descubrieron galaxias que emiten tanta

o más energía en radioondas que en luz, como son las radiogalaxias y algunos cuásares, al observar el cielo en infrarrojo (que abreviaremos como IR) también aparecieron galaxias que emiten la mayor parte de energía en IR, o sea mucho más infrarrojo que luz visible. Son las llamadas *galaxias luminosas en infrarrojo* (LIG) y las más luminosas entre ellas lucen tanto en IR como los cuásares más luminosos: las llamamos *galaxias ultraluminosas en infrarrojo* (ULIG). De hecho, la mayoría de las galaxias más brillantes del universo son de este tipo, emiten sobretodo en infrarrojo.

Son galaxias como Arp 220 (Figura 2), en las que nacen centenares, quizás mil estrellas al año, pues tienen enormes cantidades del gas frío, molecular, del que nacen las estrellas y lo tienen concentrado hacia el núcleo de tal galaxia, lo que aumenta la eficiencia de la formación de estrellas. Son unos brotes de estrellas espectaculares, mucho más intensos que los que se encuentran en galaxias normales, donde nacen a lo sumo unas pocas estrellas al año.

Las medidas de la cantidad de gas molecular<sup>2</sup> muestran que en tales galaxias hay una cantidad entre diez y cien veces superior al que hay en una galaxia normal como la nuestra.

### ¿Qué produce esta abundancia de gas molecular y su acumulación en el centro?

Durante años no se ha sabido contestar esta pregunta ni establecer si se trata de un fenómeno excepcional o de un fenómeno habitual pero transitorio, es decir algo que les ocurre a todas las galaxias en algún momento de su vida pero que dura poco tiempo. Incluso hay quien trata de relacionarlo con los cuásares, pero la apariencia de éstos y su mayor lejanía dificulta encontrar una relación de parentesco, salvo que las ULIGs sean galaxias que alberguen en su interior un cuásar invisible debido a la gran acumulación de gas y polvo a su alrededor. Ello también podría explicar su mucha menor emisión en radiación X, comparada con la de los cuásares.

Pero una vez más una nueva tecnología puesta al servicio de la astronomía ha permitido indagar más, tener una visión más detallada del aspecto de tales galaxias infrarrojas ultraluminosas. En la década de 1990 se han puesto en marcha el telescopio espacial Hubble y telescopios en tierra de 8 a 10 metros de diámetro, así como técnicas ópticas (óptica adaptativa) que permiten mejorar la visión de otros telescopios.

Lo primero que se ha confirmado es que la acumulación de gas que se observa en las ULIGs es fruto de la colisión entre galaxias. En la galaxia

<sup>2</sup>El gas molecular, denso y frío, está compuesto sobretodo por moléculas de hidrógeno. La observación de rayas espectrales en radiofrecuencia de la molécula de monóxido de carbono (CO) es el principal modo de medir la cantidad y propiedades físicas del gas molecular en las galaxias, pues las rayas de hidrógeno molecular son difícilmente observables. La mayor parte del gas molecular de las galaxias se encuentra en nubes moleculares gigantes, cuya masa es superior a  $10^5$  masas solares.

citada Arp 220 se aprecia que hay dos núcleos muy juntos, separados unos mil años luz ( $0''8$ ) que muestran un avanzado estado de fusión de dos galaxias.

El gran número de estudios tratando de relacionar interacciones y nacimiento de estrellas realizados en los últimos diez o quince años han sido motivados en gran parte por el descubrimiento de las LIGs y las ULIGs.



Figura 2: Imagen infrarroja de Arp 220, la galaxia más luminosa del universo cercano, obtenida con la cámara NICMOS del Telescopio Espacial Hubble (HST). En ella se aprecian los núcleos de dos galaxias espirales en colisión, distantes entre sí unos mil años luz. Cortesía de R. Thompson (U. Arizona) y STScI/NASA.

### Galaxias en colisión

Ya hemos dicho que las galaxias se encuentran en grupos. La distancia entre ellas es pequeña y cabe la posibilidad de que choquen. En los cúmulos de galaxias, donde puede haber miles de galaxias en un volumen no muy grande, se producen frecuentes interacciones, en las que un par de galaxias pasan muy cerca una de otra a gran velocidad y se deforman, cada una bajo la acción del campo gravitatorio de la otra. Aunque no sea tan frecuente, se producen también choques, cuando cual fantasmas una galaxia pasa por dentro de la otra.

Durante la colisión de dos galaxias (Figura 6) las estrellas no chocan entre sí, pues hay grandes distancias entre ellas, pero su movimiento se ve alterado profundamente: en el caso de una galaxia espiral, su disco se deforma, los brazos se rompen, las nubes de gas frío se comprimen y migran hacia el núcleo produciéndose un intenso brote de nuevas estrellas. Tras el choque, se forman puentes de materia entre las galaxias y “arcos” de estrellas que son expelidos al espacio, arcos que llamamos *antenas*. Estas antenas pueden romperse originando nuevas galaxias enanas, que podrán luego caer sobre la galaxia “madre” o ser expulsadas. El proceso de colisión entre galaxias dura tanto tiempo (centenares de millones de años), que un hipotético habitante de un planeta no se enteraría. Además, las distancias entre estrellas son tan grandes que un sistema planetario como el nuestro, situado en el exterior de un disco galáctico, no tiene porque verse afectado por una colisión galáctica.

Esto es lo que les ocurre a las estrellas de dos galaxias en colisión. Pero ¿qué le ocurre al gas?. Las galaxias espirales suelen ser ricas en gas frío, que almacenan en las nubes moleculares gigantes. Por efecto de la colisión, estas enormes nubes “caen” hacia el núcleo de la galaxia. Al amontonarse allí la eficiencia en el nacimiento de nuevas estrellas aumenta mucho y se produce un enorme brote de estrellas, cuyos efectos se ven muy bien en radiación X, como muestran las recientes imágenes de los nuevos telescopios espaciales Chandra y XMM-Newton. Tales imágenes muestran que el interior de galaxias que experimentan brotes de estrellas se llena de gas muy caliente producto de miles de explosiones de supernova.

¿Es esto suficiente para explicar las galaxias ultraluminosas? Posiblemente no, pues entre las galaxias próximas que chocan no parece producirse tal fenómeno. ¿Serán aquellas galaxias en colisión especiales de alguna manera?,

Inicialmente se pensó que sí: obviamente debe tratarse de galaxias muy ricas en gas molecular. Aunque quizás esto no baste. De hecho, en 1999 un grupo de investigadores americanos y españoles descubrieron que muchas galaxias ultraluminosas (un tercio de ellas, para  $z < 0,3$ ) eran especiales además en cuanto a que parece tratarse de colisiones múltiples, en que no dos sino tres, cuatro o cinco galaxias próximas chocan a la vez. Es lo que se ha denominado *nidos de galaxias* en los que varias galaxias se mueven unas alrededor de otras, deformándose y quizás fusionándose.

Nuevos instrumentos instalados en radiotelescopios, en Mauna Kea y en Pico Veleta, están permitiendo encontrar una población de lejanas galaxias ( $z = 1 - 4$ ) aparentemente similares a las ULIGs más cercanas. Se habla de ellas tentativamente como de las galaxias *precursoras* de los cuásares.

### Galaxias anfitrionas de los cuásares

¿Podrían explicarse los cuásares de esta misma manera? ¿Podría tratarse

de un caso similar a las ultraluminosas, pero con el núcleo desnudo y, por lo tanto, bien visible y brillante? Para saberlo debemos ser capaces de ver si donde hay un cuásar hay una o varias galaxias, y cómo son y cómo se comportan éstas.

Ya en 1969 Lynden-Bell propuso la hipótesis de que los cuásares se producen en el núcleo de una galaxia, una hipótesis lógica, pues lo único que se conocía en el universo eran galaxias, de variados tipos pero galaxias al fin y al cabo. A finales de los años setenta y principios de los ochenta se llegó a entrever la luz de la galaxia que contiene un cuásar, que llamaremos *galaxia anfitriona*. Pero es de enorme dificultad distinguir la débil luminosidad de una galaxia lejana cuyo núcleo, el cuásar, brilla cien veces más que ella; podemos decir que la luz del cuásar nos deslumbra y no nos deja ver la galaxia que lo contiene.

Ha habido que esperar a los más modernos telescopios para, hacia 1995, poner de manifiesto la luz de la galaxia que hospeda el cuásar, y ello ha sido posible sólo en cuásares cercanos. Y aún ha habido discusiones, pues incluso observando con el HST hubo quien habló de cuásares *desnudos*, al no saber ver la débil luz de sus galaxias anfitrionas. Ahora hay acuerdo en que los cuásares están *vestidos*. Lo que resulta más difícil es distinguir las características de la vestimenta: ¿es una galaxia espiral?, ¿es elíptica?, ¿está sola o acompañada?.

La gran lejanía de un cuásar típico hace que sea extremadamente pequeño el tamaño con que vemos la galaxia anfitriona. Es un problema que tenemos con toda galaxia que se encuentra en el universo remoto. Uno a veces sueña con la posibilidad de poder “acercarse” o, al menos, de disponer de una “lupa” cósmica que nos permita ver más en detalle tales galaxias.

Afortunadamente esta lupa existe. Y se descubrió precisamente estudiando un cuásar peculiar.

### Lentes gravitatorias

En 1979 Walsh y sus colaboradores estaban buscando la contrapartida óptica a varias radiofuentes a fin de medir su espectro para conocer de qué tipo de astro se trataba: un cuásar, una radiogalaxia, etc. En la dirección de una de estas radiofuentes encontraron dos puntos brillantes, de aproximadamente la misma magnitud, separados  $6''$  (1/300 del diámetro de la Luna) y tomaron un espectro de cada uno de ellos. Su gran sorpresa fue encontrar que tales espectros eran idénticos y que correspondían a dos cuásares que se encuentran a la misma distancia de nosotros. La probabilidad de encontrar en una misma dirección dos cuásares con las mismas características es prácticamente nula, por lo que llegaron a la conclusión, arriesgada pero inexcusable, de que se trata de dos imágenes de un mismo cuásar causadas por una lente gravitatoria, presumiblemente

una galaxia interpuesta entre el cuásar y nosotros. Ahora se le conoce como *el cuásar gemelo*.

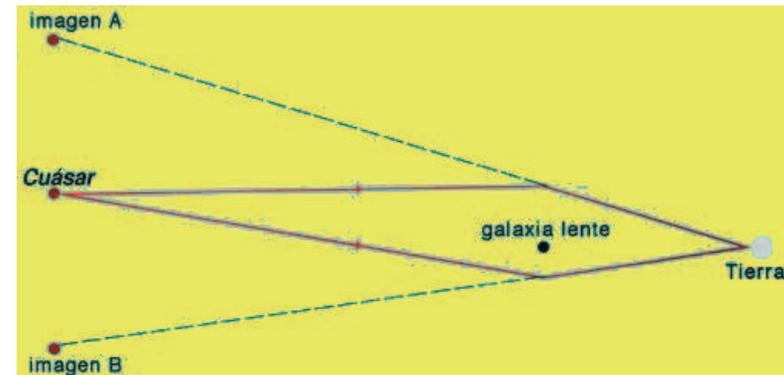


Figura 3: Esquema de una lente gravitatoria. La radiación de un cuásar lejano alineado con una galaxia es percibida por el observador como proveniente de dos puntos del cielo, dos imágenes del mismo astro producidas por la galaxia intermedia actuando como lente. Tal es el caso del cuásar “gemelo” QSO 0957+561 descubierto en 1979.

Al año siguiente Stockton encontró la galaxia lente, una galaxia elíptica casi sumergida en la imagen inferior del cuásar, que se ve claramente cuando se sustraen las dos imágenes del cuásar. Esta galaxia era la primera *lente gravitatoria* potente descubierta.

¿Qué es una lente gravitatoria? Es un astro de gran masa (tal como una galaxia o un cúmulo de galaxias) capaz de desviar apreciablemente la luz de astros más alejados situados aproximadamente en la misma dirección (Figura 3). Desplazan su posición, distorsionan su apariencia, amplifican su brillo y generan varias imágenes.

En los últimos veinte años se han descubiertos decenas de lentes gravitatorias, algunas mucho más complejas. El cuásar Q2237+0305 es el primer caso descubierto en que se producen cuatro imágenes brillantes del cuásar, actuando como lente el núcleo de una galaxia espiral interpuesta. A ésta se la denomina *cruc de Einstein* y la siguiente que se descubrió de este tipo se denomina *trébol de cuatro hojas*.

En fin, un cuásar se ve como un punto, pero la imagen que da de él una lente gravitatoria es de varios puntos. ¿Y qué ocurre cuando el objeto es extenso, como es el caso de una galaxia?

Una lente también puede producir una imagen en forma de arco, que no es más que la imagen extremadamente deformada de una galaxia lejana. Se conocen ya decenas de arcos, habiendo sido descubierto el primero en

1985. A diferencia de un cuásar, una galaxia es extensa y cada zona de la galaxia da su imagen en un sitio distinto, de ahí que la imagen aparezca extensa. De hecho, las propiedades de las lentes gravitatorias hacen que la imagen de un objeto extenso pueda ser mucho más extensa que el original: este es el efecto “lupa” del que hablábamos anteriormente.

Si las lentes nos engañan deformando, amplificando y multiplicando las imágenes, ¿cómo podemos usarlas para que nos ayuden a conocer las galaxias lejanas del universo? Lo vamos a ver en el caso del cuásar gemelo, antes citado.

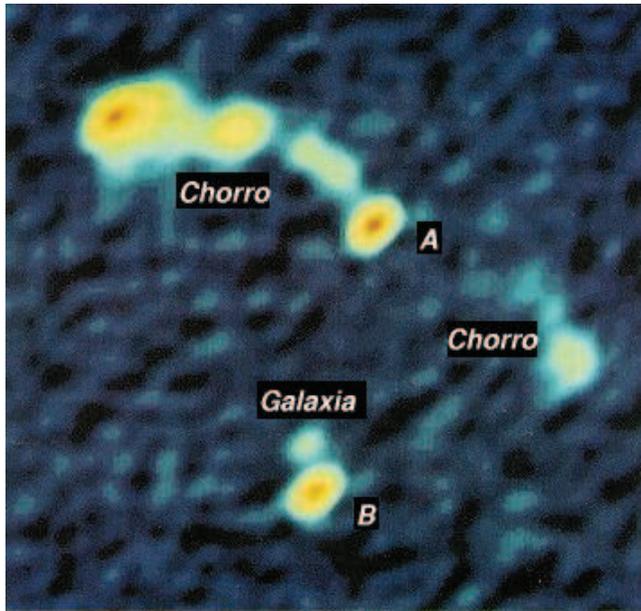


Figura 4: Radioimagen del cuásar gemelo obtenida con el interferómetro VLA (Nuevo Mexico). En ella se aprecian las dos imágenes (A y B) del cuásar, la galaxia lente y los chorros de plasma que, por su situación relativa a la lente, sólo aparecen asociados a la imagen A. Cortesía de NRAO.

### El cuásar gemelo

Hasta 1999 lo que se conocía del cuásar gemelo era su apariencia óptica, que muestra las dos imágenes del cuásar (de magnitud 16,7,  $z = 1,414$ ) y la

de la galaxia lente (una elíptica de magnitud 18,5). También se conocía su apariencia en radio (Figura 4), que muestra las dos imágenes puntuales del radio-cuásar y dos chorros de plasma<sup>3</sup> que parecen salir sólo de la imagen superior, lo cual indica que los chorros se encuentran fuera del efecto de la lente gravitatoria. Este tipo de chorros son típicos en las radiogalaxias. Veinte años después de su descubrimiento no se conocía todavía nada de la galaxia anfitriona de este cuásar.

La dificultad proviene, como ya se ha dicho, del gran contraste de luminosidad entre el cuásar y la galaxia que lo contiene. Una alternativa consiste en observarlo en un rango de longitudes de onda en que tal contraste no existe: tal es el caso de las medidas del gas molecular, que suele estar distribuido por la galaxia y no es detectable en el propio cuásar, de manera que si se detecta procederá de la galaxia anfitriona. Aunque a la distancia que corresponde a  $z = 1,414$  el gas molecular no sería detectable con ningún radiotelescopio actual, el efecto amplificador de la lente gravitatoria nos permitió su detección con el interferómetro de IRAM en el Plateau de Bure (Francia). Además, el efecto lupa ha sido suficiente para mostrar que dicho gas no está concentrado en el núcleo, como se esperaría si fuera una galaxia del tipo ULIG, sino que se distribuye en el disco de la galaxia anfitriona (Figura 5). La conclusión a que se llega es que se trata de una galaxia espiral parecida a la Vía Láctea en cuanto a su contenido en gas molecular y la extensión de éste, lo cual no es nada habitual en este tipo de detecciones de gas molecular en el universo lejano, que suelen corresponder a galaxias con un contenido de gas molecular diez veces mayor.

Las medidas espectroscópicas permiten conocer los movimientos del gas, además de su cantidad y extensión. Nuestro estudio ha revelado la posible presencia de una galaxia compañera algo menos rica en gas molecular, cuya interacción con la otra podía haber provocado el fenómeno cuásar en su núcleo.

La conclusión de todo ello es que los cuásares lejanos no tienen porque originarse de manera distinta a los cercanos. Hace unos años se pensaba que los cuásares se producían en un brote inicial de estrellas en una joven galaxia muy rica en gas molecular. Ahora se piensa que los cuásares pueden originarse en galaxias bien desarrolladas, “maduritas”, si se dan simultáneamente varias condiciones, tales como: presencia del agujero negro central, disponibilidad de suficiente gas molecular y, quizás, interacción con otra galaxia.

<sup>3</sup>Gas ionizado que puede alcanzar una gran extensión y se suele detectar por su radioemisión sincrotrón, la emitida por partículas cargadas moviéndose en campos magnéticos intensos o extensos.

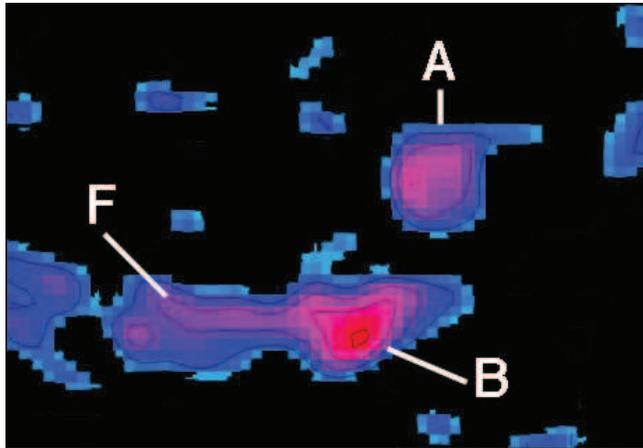


Figura 5: Intensidad de la emisión de monóxido de carbono, el trazador de gas molecular, en la dirección del cuásar QSO 0957+561. Los picos de emisión etiquetados A y B se encuentran en la posición de las imágenes del cuásar producidas por la lente gravitatoria. La región F no aparece en las imágenes ópticas y demuestra que el gas molecular se distribuye en una región extensa alrededor del cuásar, de varias decenas de miles de años luz de diámetro.

### La vida de las galaxias

Nuevos telescopios y nuevas técnicas, como la antes descrita, utilizados en los últimos años nos están dando a conocer nuevos y diversos aspectos de la evolución de las galaxias y sugieren pistas por donde proseguir los estudios.

Vamos a resumir una presumible vida de las galaxias, compatible con los datos actualmente conocidos. Se trata de una descripción tentativa, en absoluto definitiva, pues queda mucho por descubrir y aprender.

Dado que las cifras que se manejan para describir la edad del universo son “astronómicas”, lo “humanizaremos” considerando, con propósitos didácticos, que el universo actual tiene 40 ‘años’.

Según este símil, podemos decir que tenemos pocos datos para describir acertadamente los primeros ‘años’ de edad de las galaxias en el universo conocido. Pero parece claro que en su infancia las condiciones en que se desenvolvían las galaxias eran muy distintas a las actuales.

Las galaxias debieron formarse por la concentración y colapso de nubes átomos de hidrógeno y de helio primordiales, o sea átomos formados durante la fase inicial de vida del universo conocida como Gran Explosión.

Se piensa que las galaxias debieron nacer aproximadamente al mismo tiempo, unos centenares de millones de años tras la Gran Explosión (a los 9 ‘meses’, en nuestro símil), época que nos viene indicada por la edad de sus estrellas más viejas.

Siguiendo con nuestro símil, la galaxia más lejana hoy conocida emitió la luz que vemos cuando el universo tenía un par de ‘años’, o sea el 5% de su edad actual, según un cierto modelo de universo.

Es posible que se hayan visto y nos hayan pasado inadvertidas galaxias más alejadas, pero los instrumentos actuales están en el límite de lo que pueden dar midiendo distancias. Esta es una de las motivaciones de todas las propuestas de nuevos instrumentos: el telescopio espacial de nueva generación, que será mayor que el actual y funcionará en infrarrojo medio, el telescopio espacial infrarrojo Herschel y el radiointerferómetro ALMA<sup>4</sup>, que darán visiones complementarias de las galaxias más lejanas.

El análisis de centenares de galaxias en el universo lejano muestran que hubo una época de gran actividad entre los 5 y los 14 ‘años’ ( $z$  entre 3 y 1, edad del Universo entre el 12% y el 35% de la actual). Las galaxias de tal época “infantil” parecen más turbulentas y activas, con más colisiones (Figura 6). A menudo son colisiones múltiples, dando lugar a formas más caóticas que las que encontramos en el universo actual. Esta es también la época de mayor abundancia de cuásares y de mayor ritmo en el nacimiento de estrellas en toda la historia del Universo.

Casi la mitad de las galaxias de aquella época parecen ser irregulares, un porcentaje mucho mayor que ahora. Se cree que ello es debido a las frecuentes colisiones de tal época. Hay que recordar que entonces el universo era más pequeño y había más galaxias en él. Además se ven muchas galaxias azules minúsculas, que ahora parecen haber desaparecido. Posiblemente acabaron engullidas en las galaxias espirales gigantes actuales. Nuestra propia galaxia puede haber “digerido” numerosas pequeñas galaxias.

Fruto de tales fusiones y de la viscosidad de los gases que hay en las galaxias, se puede haber acumulado una gran masa en el centro de ellas originando un intenso brote de estrellas. Parte de esta masa puede haber colapsado en forma de un gigantesco agujero negro que, como propuso Zeldovich, se cree es el motor de lo que llamamos *galaxias con núcleo activo*. El nuevo material caído en colisiones posteriores lo “alimenta” en lo que constituye esta fase transitoria de la vida de algunas galaxias que llamamos fenómeno *cuásar*. Este debe ser de corta duración pues de lo contrario, tratándose de un fenómeno muy energético, alteraría profundamente la galaxia que lo contiene. Para que se manifieste el cuásar hay, pues, que esperar que se forme el gran agujero negro y deja de

<sup>4</sup>Véase el artículo sobre ALMA de nuestro colega Rafael Bachiller en el ANUARIO de 2001.

manifestarse cuando, al finalizar la colisión o agotar el gas denso y frío, el “monstruo” se aletarga falto de alimento. Las escasas colisiones entre las galaxias del universo actual y la menor cantidad de gas molecular que contienen explica que apenas haya cuásares cercanos.



Figura 6: La gran galaxia espiral NGC 2207 (izquierda) está deformando la galaxia espiral próxima IC 2163 (derecha), cuya velocidad relativa no es suficiente para escapar de la atracción gravitatoria de la mayor. Dentro de unos miles de millones de años ambas se habrán unido en una sola galaxia.

En el universo “adolescente”, de unos 15 ‘años’ de edad ( $z = 1$ ), se ven galaxias similares a la Vía Láctea cuando eran bastante más jovencitas. Se ven algo distintas, lo cual es de esperar en un universo más pequeño en que las colisiones todavía son frecuentes, a pesar del aumento de tamaño del universo<sup>5</sup>. Las galaxias espirales “adolescentes” suelen ser más luminosas que ahora, más ricas en gas molecular, su estructura espiral es más caótica y sus brazos tienen numerosas nebulosas brillantes, pues experimentan intensos brotes de estrellas (¿acné galáctico?). Siguen abundando las galaxias irregulares y peculiares ( $\sim 30\%$  del total).

<sup>5</sup>El volumen del universo es proporcional a  $(1+z)^{-3}$ . Es decir, el universo que observamos a  $z = 1$  era ocho veces menor que el actual.

Las espirales son más abundantes, pues no han tenido tanto tiempo para fusionarse, en unirse varias en una sola galaxia, lo que a menudo da lugar a galaxias elípticas. Algunas de estas uniones, en que se ven involucradas varias galaxias ricas en gas, dan lugar a galaxias ultraluminosas en el infrarrojo (ULIGs).

A veces es posible ver restos, cicatrices de algún suceso reciente. Tal es el caso de la galaxia elíptica gigante NGC 1316, donde las imágenes revelan la presencia de polvo y de cúmulos estelares, que parecen provenir de una galaxia espiral que fue literalmente *tragada* por la elíptica hace menos de cien millones de años.

### Las galaxias actuales

Tras este recorrido evolutivo llegamos a las galaxias de hoy. Entre las galaxias espirales actuales encontramos algunas perfectamente diseñadas y una cierta abundancia de galaxias espirales *barradas*, que algunos opinan que son un tipo de galaxia relativamente reciente ( $z < 0,5$ ).

Cuando contemplamos una galaxia cercana debemos pensar en ella como algo especial. Su nacimiento y su vida son únicos: cada una tiene su historia particular de encuentros con otras galaxias, de fusiones con otras más pequeñas; ha tenido sus brotes de estrellas, sus explosiones de supernova, sus fases de actividad en el núcleo, quizás su fase cuásar. La Vía Láctea misma ha tenido una larga y posiblemente azarosa vida, como demuestra el gran agujero negro que tiene agazapado en su núcleo, por lo que pudo pasar por una fase de *minicuásar*.

Desde el siglo 18, con Kant, Wright y otros, se ha hablado de “universos isla”, expresión aparentemente afortunada que sugiere la idea de una vida aislada para las galaxias, una vida solitaria, independiente, en que mantiene su forma inicial a lo largo del tiempo. Tras lo que acabamos de contar, esa es una idea alejada de nuestra visión actual de la vida de las galaxias. Las galaxias están acompañadas. En general, su vida transcurre en grupos o en cúmulos, donde ha tenido numerosos encuentros e incluso choques, pudiendo llegar a unirse, a fusionarse con otras, proceso que debe haber ocurrido a menudo en el universo joven y que puede haber dado lugar a profundos cambios de identidad. La colisión de dos preciosas espirales puede dar lugar a una aburrida elíptica o puede dar lugar a una espiral mayor. Se sospecha que la galaxia de Andrómeda se ha formado por fusión de galaxias espirales de tamaños comparables entre sí.

En resumen, las galaxias que vemos son las supervivientes y su aspecto actual, que las hace distinguibles entre sí, es presumiblemente muy distinto del que tenían al nacer. Incluso la cohorte de galaxias vecinas contribuyen a dotar a cada galaxia de una apariencia individualizada, de hacerla reconocible y, en ocasiones, contribuir a mantener su estructura espiral.

## Las galaxias del mañana

Las galaxias siguen vivas. Su morfología ha cambiado a lo largo de su vida y continuará haciéndolo. En las espirales siguen naciendo estrellas, habitualmente a un ritmo de unas pocas por año, pues hay un reciclaje del material del que se forman, de manera que no se agota. Ocasionalmente se produce un brote intenso de estrellas, en que nacen centenares de estrellas al año. Esta situación podría producirse en la Vía Láctea si dentro de unos tres mil millones de años chocara con nuestra vecina, la galaxia de Andrómeda.

Si ello fuera a ocurrir, podríamos preguntarnos: ¿Cómo cambiará nuestra Vía Láctea tras su hipotética colisión con Andrómeda? ¿Se unirán formando una elíptica o mantendrá su identidad, su forma espiral? ¿Se producirá un intenso brote de nuevas estrellas? ¿Se activará el minicuásar dormido en su núcleo o ya han pasado sus condiciones para ello? ¿Abandonará nuestro Sol la galaxia, lanzado al espacio en una espectacular *antena*? En definitiva, ¿qué aspecto tendrá la Vía Láctea dentro de unos miles de millones de años? Por el momento sólo podemos aventurar que su aspecto será distinto del actual.

## Bibliografía

F.H. Chaffee *Descubrimiento de una lente gravitatoria* Investigación y Ciencia, enero 1981.

P. Planesas, J. Martín-Pintado, R. Neri, L. Colina *Gas-rich galaxy pair unveiled in the lensed quasar 0957+561* Science, 24 diciembre 1999

P. Planesas y J. Martín-Pintado *Las galaxias anfitrionas de los cuásares* Tribuna de Astronomía y Universo, mayo 2000

R.G. Abraham y S. van den Bergh *The morphological evolution of galaxies* Science, 17 agosto 2001