

RADIOGALAXIAS LEJANAS:

Nacimiento e infancia de las galaxias gigantes

Montserrat Villar y Miguel Angel Perez Torres (IAA)

Hace más de diez mil millones de años, cuando las galaxias eran jóvenes y empezaban a agruparse para formar las primeras galaxias gigantes y los primeros cúmulos de galaxias, existían ya agujeros negros de masas enormes, de hasta mil millones de masas solares. Estos agujeros negros permanecen, como una araña en su telar, a la espera de que material apetitoso (estrellas y gas) se acerque fatalmente para engullirlo. La digestión es pesada y desencadena una serie de fenómenos enormemente energéticos que, en algunos casos, pueden detectarse hasta los confines del Universo observable.

El caso quizá más espectacular sea el de las radiogalaxias. Mientras las galaxias normales suelen emitir la mayor parte de su energía en longitudes de onda visibles, las radiogalaxias emiten en longitudes de onda de radio una energía que es comparable, e incluso decenas o centenas de veces mayor, a la energía emitida por la galaxia en el resto del espectro electromagnético. La imagen óptica de una radiogalaxia cercana muestra una galaxia elíptica aparentemente normal. Sin embargo, el aspecto de la galaxia en longitudes de onda de radio es extraño y llamativo. Vemos dos lóbulos (Fig. 1), que se hallan separados del núcleo galáctico por distancias de hasta varios millones de años luz y se extienden mucho más allá de los confines de la galaxia. A menudo se observan también chorros muy colimados de material eyectado por el núcleo, que se abren paso a través de la galaxia a velocidades que se aproximan a la de la luz. La fuente de energía que alimenta estas estructuras es el agujero negro supermasivo localizado en el núcleo de la galaxia.

Las radiogalaxias como herramienta cosmológica

Uno de los objetivos fundamentales de la Astrofísica es el estudio de la época cósmica en la que se ensamblaron las primeras galaxias. De

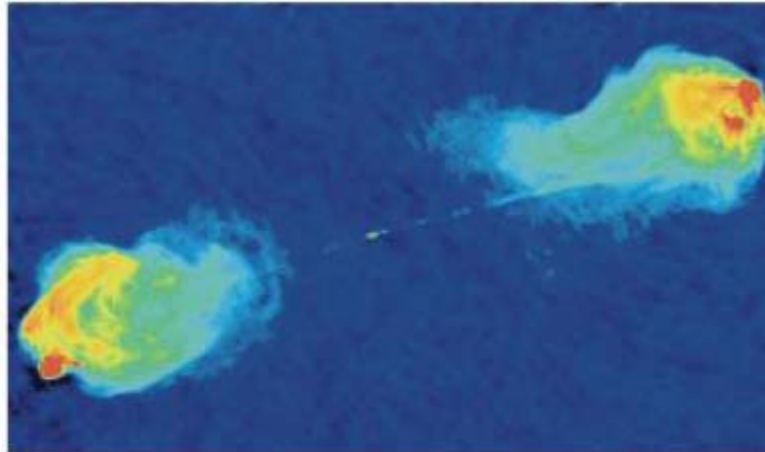


Fig. 1. Imagen de una radiogalaxia en longitudes de onda de radio. El código de colores indica, en orden creciente, del azul al rojo, la emisión en radio. Dos lóbulos de gran tamaño dominan la apariencia del objeto. Chorros de material altamente colimado son expulsados desde el núcleo hacia el exterior de la galaxia. Cuando los chorros impactan con el medio intergaláctico, el chorro deja de ser colimado y empieza a formarse el lóbulo. La galaxia, y como la veríamos con nuestros ojos, ocuparía solo el punto rojo central, mientras que la radiogalaxia se extiende en ocasiones hasta varios millones de años luz, un tamaño similar al que ocuparían más de cincuenta galaxias como la nuestra. Fuente: NRAO

ahí que los astrónomos hayamos perseguido con ahínco la posibilidad de alejar cada vez más el límite del Universo observable. Las radiogalaxias, gracias a su enorme luminosidad en longitudes de onda de radio y a la fuerte emisión de su espectro óptico, se han convertido en una de las mejores herramientas de estudio del Universo temprano, ya que es posible detectarlas a enormes distancias. De hecho, en la década de los 80, las radiogalaxias eran las galaxias más distantes conocidas en el Universo, pues emitieron la luz que hoy vemos con nuestros telescopios cuando el Universo contaba tan solo con unos 2.500 millones de años, aproximadamente un 18% de su edad actual, cifrada en 13.700 millones de años. Al representar las radiogalaxias las primeras etapas en la formación de galaxias gigantes, las radiogalaxias ocuparon un papel fundamental en Cosmología.

En efecto, las radiogalaxias lejanas presentaban tres características muy llamativas: una elevada intensidad de la emisión de hidrógeno ionizado, el color muy azulado de su radiación óptica y una morfología irregular y con múltiples componentes. Estas

propiedades eran las que los astrónomos esperaban encontrar en galaxias cuya formación apenas hubiera comenzado. Se pensó por ello que las radiogalaxias más distantes se hallaban en formación.

Sin embargo, dos grupos de astrónomos publicaron, a finales de los 80 y de modo independiente, un resultado asombroso: las estructuras observadas en imágenes tomadas en el óptico de radiogalaxias lejanas presentaban un estrecho alineamiento con el eje definido por las estructuras observadas en radio. Este dato observacional alertó a los astrónomos sobre la posibilidad de que las propiedades ópticas de las radiogalaxias pudieran ser el resultado de la actividad nuclear originada en el agujero negro supermasivo, en lugar de ser indicativos de formación estelar a gran escala, como se esperaría de una galaxia en formación. Quedó clara que era crucial entender cómo la actividad nuclear del agujero negro distorsionaba las propiedades observadas de las radiogalaxias, antes de extraer conclusiones sobre su estado evolutivo.

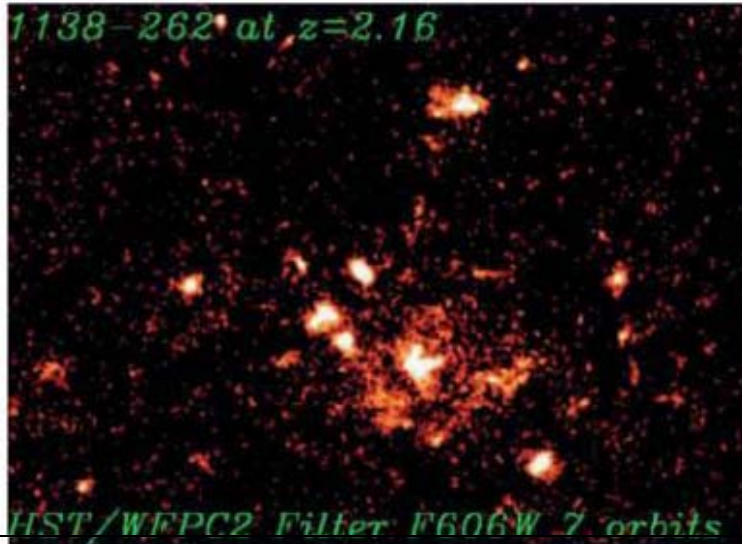
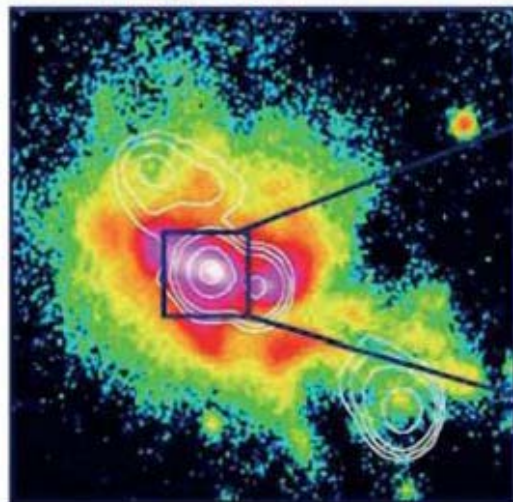


Fig. 2. Imagen óptica, obtenida con el Telescopio Espacial Hubble, de una radiogalaxia lejana observada cuando el Universo tenía unos 3 000 millones de años (su edad actual es de unos 13 700 millones de años). El aspecto irregular y con múltiples componentes (en color naranja y blanco) de la radiogalaxia sugiere que se trata de un sistema de galaxias en interacción con intensa formación estelar.



Nebulosa gigante asociada con una radiogalaxia distante.



Varias decenas de galaxias similares a nuestra Vía Láctea cabrían dentro de la nebulosa.

Fig.3: las radiogalaxias lejanas se hallan rodeadas por nebulosas gigantes, con tamaños que en ocasiones alcanzan varios cientos de miles de años luz.

La crisis del sector

La década de los 90 vivió un cambio importantísimo en los estudios del Universo temprano, provocado por el descubrimiento de una población de galaxias tan distantes como las radiogalaxias más lejanas conocidas entonces. Son las llamadas galaxias del "corte de Lyman", por la técnica utilizada para identificarlas, y que muestran una intensa actividad de formación estelar, pero sin signos aparentes de fenómenos asociados con un agujero negro supermasivo. Las radiogalaxias perdieron así su papel protagonista en Cosmología, pues dejaban de ser las galaxias más distantes conocidas. Al hacer su aparición las galaxias del corte de Lyman, se contaba con una familia

numerosa, compuesta por docenas de galaxias lejanas (miles en la actualidad), candidatas excelentes para realizar estudios cosmológicos, y cuyas propiedades podían interpretarse con la existencia de gas, polvo y estrellas, sin la complicación añadida de un agujero negro nuclear. El estudio de las radiogalaxias distantes perdió interés a medida que terminaba la década de los 90. Hubo una "migración" de astrónomos, que dejaban el tema de investigación de las radiogalaxias para dedicarse al campo más novedoso y competitivo abierto con el descubrimiento de las galaxias del corte de Lyman. Del mismo modo que las nuevas tecnologías han obligado a muchos trabajadores y empresarios a replan-

tearse cómo podían hacer competitiva su actividad profesional, los expertos en radiogalaxias se plantean las siguientes cuestiones: 1) ¿Tiene sentido seguir estudiando las radiogalaxias lejanas? 2) ¿Qué hace su estudio competitivo y único?. Con otras palabras, ¿qué información puede aportarnos las radiogalaxias lejanas que no podemos obtener con otras "familias" de galaxias distantes como las del corte de Lyman?.

La reconversión del sector

Allá por el año 2000, la dura competición de las radiogalaxias con esa nueva y fascinante área de investigación impulsada por el descubrimiento de las galaxias del corte de Lyman parecía insalvable, pues el nú-

mero de radiogalaxias lejanas conocidas seguía siendo de apenas unas docenas, mientras ya se habían descubierto más de mil galaxias del corte de Lyman, y este número no cesaba de aumentar. Esta crisis tuvo el efecto positivo, al conseguir un gran avance en atribuir a las radiogalaxias su verdadero papel en Cosmología, entre la pléora de galaxias lejanas conocidas hoy. Esta necesaria "reconversión" del sector se ha realizado gracias a la obtención de varios resultados observacionales de gran trascendencia, gracias a los que el interés en este campo se ha reactivado de forma importante. Entre estos resultados cabe destacar los siguientes:

1. Las radiogalaxias lejanas son progenitoras de las galaxias elípticas gigantes que vemos en el Universo cercano. Con el paso del tiempo, las radiogalaxias se convertirán en galaxias elípticas gigantes. Por tanto, las radiogalaxias más alejadas son estu- pendios laboratorios para estudiar el nacimiento y la infancia de las galaxias más masivas que conocemos.

2. Una fracción muy importante de las radiogalaxias más lejanas podría ha-

llarse en proceso de formación. Esto lo sugiere la morfología óptica, que revela multitud de componentes que están formando estrellas muy activamente, similares a los observados en galaxias en interacción (Fig.2).

3. Las radiogalaxias lejanas se hallan frecuentemente rodeadas por nebulosas gigantes y de enorme luminosidad. En efecto, estas nebulosas tienen tamaños de varios cientos de miles de años luz, suficiente para albergar decenas de galaxias como nuestra Vía Láctea en una sola de ellas (Fig.3). Diversos autores han propuesto que estas nebulosas constituyen la reserva gaseosa a partir de la que la galaxia central comenzó a formarse y que, en algunos casos, tal vez aún esté formándose.

4. Las radiogalaxias distantes habitan en ambientes ricos, es decir, están rodeadas de un número elevado de galaxias compañeras. Algunos resultados observacionales refuerzan la idea de que estas radiogalaxias se encuentran en el centro de cúmulos de galaxias en formación. Gracias a su gran brillo, las radiogalaxias constituyen una valiosa herramienta

para identificar y estudiar cúmulos de galaxias en el Universo lejano. De hecho, es muy posible que sean trazadores de las regiones más densas del universo conocido.

En resumen, las radiogalaxias lejanas siguen desempeñando un papel fundamental en los estudios cosmológicos, pues nos aportan información única sobre el proceso de formación y la infancia de las galaxias más masivas que conocemos, así como de los cúmulos de galaxias. En los próximos diez años, el proyecto ALMA (la red milimétrica de telescopios en Atacama, Chile) permitirá ampliar el Universo observable hasta límites insospechados hace apenas diez años, y supondrá un gran avance en nuestra comprensión del Universo lejano en general y de las radiogalaxias más distantes en particular. ALMA será la gran máquina del tiempo: nos permitirá viajar atrás en la vida del Universo y ver cómo fueron su nacimiento y su infancia, y entender cómo y cuando se formaron las primeras galaxias.

EL PROBLEMA DE LAS NEBULOSAS GIGANTES

Montserrat Villar (IAA)

Las radiogalaxias lejanas se hallan inmersas en regiones gaseosas (nebulosas) gigantes que podrían albergar varias docenas de galaxias como la Vía Láctea (Fig.3). Pueden alcanzar extensiones enormes de varios cientos de miles de años luz. Este tamaño es equivalente a varias veces la distancia que nos separa de las Nubes de Magallanes. No conocemos nebulosas tan grandes en el Universo cercano y el misterio de su origen ha traído de cabeza a los investigadores desde su descubrimiento hace casi veinte años.

La idea de que estas nebulosas gigantes son la gran reserva gaseosa a partir de la que comenzó a formarse la galaxia central cobra cada vez más adeptos entre los astrónomos. Esta interpretación ha adquirido más fuerza gracias al trabajo publicado recientemente por un equipo internacional de astrofísicos liderado por la autora de este artículo, investigadora Ramón y Cajal del Departamento de Astronomía Extragaláctica del IAA (CSIC). Los modelos más populares que tratan de explicar cómo se formaron las primeras galaxias predicen que todo comienza con el colapso de una gigantesca reserva de gas muy caliente (varios millones de grados centígrados) bajo el efecto implacable de la fuerza gravitatoria. Durante este proceso,

el gas se va enfriando y una parte del mismo se fragmenta en porciones pequeñas y densas. Se trata de los "ladrillos" galácticos que, amalgamándose unos con otros, darán lugar a la formación de una galaxia más masiva. Por tanto, un ingrediente fundamental en el escenario de la formación de una galaxia masiva es una nebulosa gigante en proceso de colapso.

Este grupo de investigación ha estudiado durante varios años las propiedades de las nebulosas que rodean a las radiogalaxias distantes, utilizando fundamentalmente datos de espectroscopia e imagen con los que han realizado análisis detallados de la morfología de las nebulosas, los elementos químicos que contiene el gas y sus movimientos. Con sus investigaciones ha demostrado que las propiedades de las nebulosas gigantes que rodean a las radiogalaxias son similares a las predichas por los modelos de formación de galaxias. Aunque el trabajo continúa para poner a prueba escenarios alternativos, todo ello sugiere que podríamos estar presenciando el verdadero nacimiento de las galaxias más masivas que conocemos.

(Referencias útiles: Villar-Martín et al. 2005, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters*, en prensa; Villar-Martín et al. 2003, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 346, 273).

EL NÚCLEO DE J2330+3927

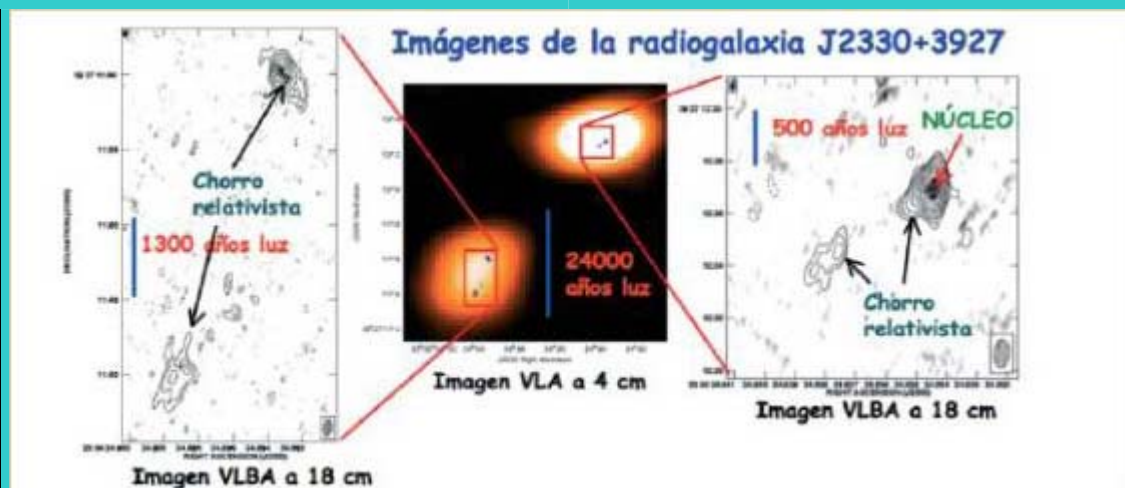
Miguel Ángel Pérez Torres (IAA)

Las radiogalaxias lejanas se encuentran tan distantes de nosotros que toda la luz que recibimos, incluida la que captan los radiotelescopios, se emitió hace más de diez mil millones de años. En esa época, ni la Tierra, ni el Sol habían nacido, y nuestra galaxia, la Vía Láctea, aún no era la galaxia que hoy conocemos. Por ello, el estudio de las radiogalaxias lejanas nos ayuda a entender cómo se formaron las primeras galaxias gigantes en el Universo, y de ahí que los astrofísicos utilicen los telescopios más grandes y sensibles para observarlas con detalle. Sin embargo, la enorme distancia que nos separa de las radiogalaxias hace que aparezcan como "puntos gordos" en las imágenes, incluso utilizando los radiotelescopios más grandes de que disponemos. De hecho, para un estudio detallado necesitaríamos construir un radiotelescopio que fuera del tamaño del radio terrestre, unos 6.500 kilómetros. Incluso si tuviéramos el dinero para construir una antena tan espectacular, la obra de ingeniería solo sería realizable en nuestra imaginación, y equivaldría a construir la "Estrella de la Muerte", la gigantesca nave -del tamaño de la Luna- que destruye Luke Skywalker en la primera entrega de la saga de la Guerra de las Galaxias. ¿Qué hacer entonces?

Por suerte, hace años que los radioastrónomos descubrieron un modo de obtener imágenes de alta resolución sin tener que construir radiotelescopios monstruosamente grandes. El truco consiste en observar simultáneamente la radiogalaxia con varios telescopios de dimensiones más "manejables", digamos del tamaño de una piscina municipal (25 metros de largo), y después combinar esa información. Si observamos con varios de estos radiotelescopios, separados por una distancia de 6.500 kilómetros, la resolución total que obtenemos equivale a la de un radiotelescopio que tuviera un diámetro de 6.500 kilómetros. Puede parecer magia, pero no es más que Física: la técnica se conoce como radiointerferometría, y permite la obtención de imágenes de objetos hasta 100.000 veces más pequeños que los

que podemos observar con un único telescopio.

Recientemente, un equipo internacional de astrofísicos liderado por el autor de este artículo, investigador Ramón y Cajal del grupo de radioastronomía del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), ha utilizado el radiointerferómetro VLBA (una red de diez antenas idénticas de 25 metros de diámetro repartidas por todo el territorio de los Estados Unidos) para observar la radiogalaxia J2330+3927, situada a 11.300 millones de años luz de nosotros. Los resultados de las observaciones han aparecido publicados en la revista especializada *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Las observaciones han permitido obtener imágenes de altísima resolución espacial de las partes más internas de la radiogalaxia, cuando el Universo contaba con tan sólo 2.400 millones de años (un 18% de su edad actual). Con estas observaciones, el grupo de astrofísicos ha podido localizar claramente el núcleo de la radiogalaxia, el lugar donde se hospeda un hambriento agujero negro de hasta miles de millones de masas solares. La altísima resolución del VLBA también ha permitido distinguir detalles que eran invisibles con radiointerferómetros más pequeños (ver imagen inferior). Así, los astrofísicos han podido detectar tanto los potentes chorros relativistas de emisión en radio eyectados por el agujero negro, como la zona donde está localizado el lóbulo de fuerte emisión en radio que se origina cuando el chorro de material que expelle el núcleo choca con el medio externo a la radiogalaxia (ver también imagen). Resulta sobrecogedor pensar que un chorro relativista -fuertemente emisor y que marcha a velocidades muy cercanas a la de la luz- pueda alcanzar distancias tan grandes como la que separa nuestro planeta del centro de la Vía Láctea. Si un buen día el núcleo de nuestra galaxia lanzara un chorro así en nuestra dirección (también sería mala suerte, claro), a nuestra civilización le quedarían unos 25.000 años de vida. Por fortuna, los astrofísicos están convencidos de que el agujero negro de nuestra galaxia está profundamente dormido.



Imágenes de la radiogalaxia J2330+3927. El panel central muestra la imagen obtenida con el interferómetro VLA, equivalente a un telescopio de 30 kilómetros de diámetro. Aunque se detecta emisión de dos zonas, la resolución del VLA es insuficiente para ver detalles finos de la emisión y por tanto entender en detalle la física del objeto. Los paneles laterales muestran el resultado de las observaciones de Pérez Torres y colaboradores, usando el interferómetro VLBA, equivalente a un telescopio de más de 8000 kilómetros de diámetro. La altísima resolución obtenida con el VLBA permite distinguir claramente las regiones radioemisoras, que resultan ser zonas mucho más localizadas dentro de los "puntos gordos" de emisión: el núcleo de la radiogalaxia, donde se hospeda un agujero negro supermasivo, y el lóbulo inferior, formado cuando el chorro relativista que es eyectado por el núcleo de la galaxia interactúa con el medio circungaláctico.