



# LIRGI

Una mirada profunda  
en radio a las galaxias  
luminosas en el infrarrojo

MIGUEL ÁNGEL PÉREZ TORRES Y ANTXON ALBERDI ODRIÓZOLA

Las galaxias luminosas en el infrarrojo son verdaderas fábricas de supernovas. En el proyecto LIRGI nos planteamos el estudio detallado de las regiones centrales de una muestra de estas galaxias en el Universo local, utilizando radiointerferómetros, con el objetivo de caracterizar sus propiedades físicas y aplicarlas a galaxias del Universo temprano.

### BROTOS DE FORMACIÓN ESTELAR EN GALAXIAS

Imaginemos una galaxia espiral con una masa inicial de gas de 100 000 millones de veces la masa del Sol (M<sub>sol</sub>), un valor típico para estas galaxias. Supongamos que en esa galaxia se están formando estrellas continuamente, al ritmo habitual con el que lo hace la nuestra, que forma estrellas consumiendo gas a un ritmo de 0,7-1,4 M<sub>sol</sub> por año. Una galaxia así podría estar fabricando estrellas entre 70 000 y 140 000 millones de años (¡diez veces la edad del Universo actual!) aumentando su población estelar continuamente. Supongamos, en cambio, que en nuestra galaxia modelo se están formando estrellas de forma muy activa, gastando su combustible muy rápidamente, a un ritmo de 100 M<sub>sol</sub> por año. En dicho caso, nos encontraríamos con un problema: si se formaran estrellas continuamente, nuestra galaxia podría vivir tan solo durante 1000 millones de años, que es un tiempo significativamente inferior a la vida de una galaxia espiral como la nuestra. Obviamente, no puede ser así, por lo que deberíamos considerar que los procesos de formación estelar no podrían desencadenarse de forma continua, sino que sucederían de modo episódico; eso sí, ¡puede suceder que estos episodios sean muy violentos!

Los denominados *brotos*, o *estallidos de formación estelar* (del inglés *starburst*), son periodos en los que la formación de estrellas en una galaxia ocurre de modo muy intenso, típicamente en la zona más interna de la galaxias, ocupando un tamaño no mayor de unos 3300 años luz. Estos brotes suelen tener una duración característica de entre 50 y 100 millones de años, aunque algunos pueden llegar a durar hasta 1000 millones

de años. Para que puedan tener lugar estos brotes, es necesario que se produzca un intenso suministro de gas a las regiones centrales de las galaxias, lo que está habitualmente favorecido por procesos de fusión o interacción galáctica. Las galaxias que presentan estos brotes de formación estelar intensa se denominan *galaxias starburst*. Para comprender la física de estas galaxias se requieren observaciones en todos los rangos de frecuencia del espectro electromagnético, ya que cada rango de energía nos da información sobre los distintos ingredientes que intervienen en el proceso de formación estelar. Así, por ejemplo, la emisión en el rango milimétrico nos proporciona información sobre el contenido de gas molecular en las regiones donde nacen estas estrellas, que va a ser el nutriente fundamental para formarlas, mientras que la luz emitida en el infrarrojo nos informa sobre la presencia de partículas de polvo interestelar, un claro indicador de la presencia de protoestrellas y estrellas jóvenes.

Cuando los estallidos se producen en las regiones centrales de las galaxias, que corresponden a los brotes más compactos y luminosos, estos se encuentran envueltos por nubes de polvo que son ópticamente gruesas a longitudes de onda corta. ¿Qué quiere decir que sean gruesas? Al igual que una capa de niebla, las nubes de polvo que envuelven las estrellas nacientes absorben la luz que estas emiten. La cantidad de radiación absorbida por estas nubes está relacionada con el llamado *espesor óptico*. Si esta cantidad es muy alta se dice que la nube es *ópticamente gruesa*, es decir, absorbe gran cantidad de radiación y no nos deja ver las estrellas que oculta. Por el contrario, si la nube es *ópticamente delgada*, entonces es prácticamente transparente. Este grosor óptico depende de la longitud de on-


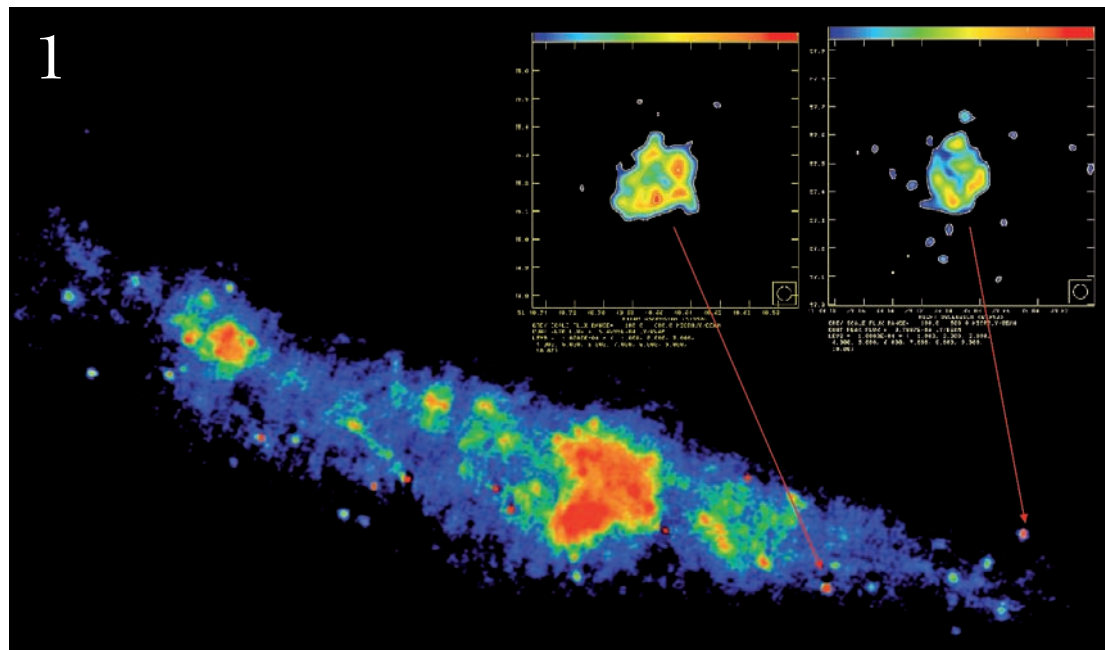
 Artículo exclusivo  
colaboración de la  
Sociedad Española  
de Astronomía

Imagen óptica de Arp 299 obtenida con el telescopio HST. Arp 299 es un sistema formado por dos galaxias en interacción, cuya luminosidad está dominada por la emisión infrarroja debida a brotes de formación estelar. (A. Heiderman, HST)

**FIGURA 1**

Imágenes radio de la galaxia M 82, que tiene un potente brote de formación estelar en sus regiones centrales. Nótese la multitud de objetos puntuales, muchos de ellos supernovas y remanentes de supernovas. Los paneles superiores muestran la estructura de los objetos individuales, gracias al uso de la radiointerferometría intercontinental. (R. Beswick, JBCA/NRAO/JIVE)



## Tanto un núcleo galáctico activo como un brote de formación estelar pueden explicar, en principio, la enorme radiación infrarroja de las galaxias luminosas y ultraluminosas en esta región del espectro

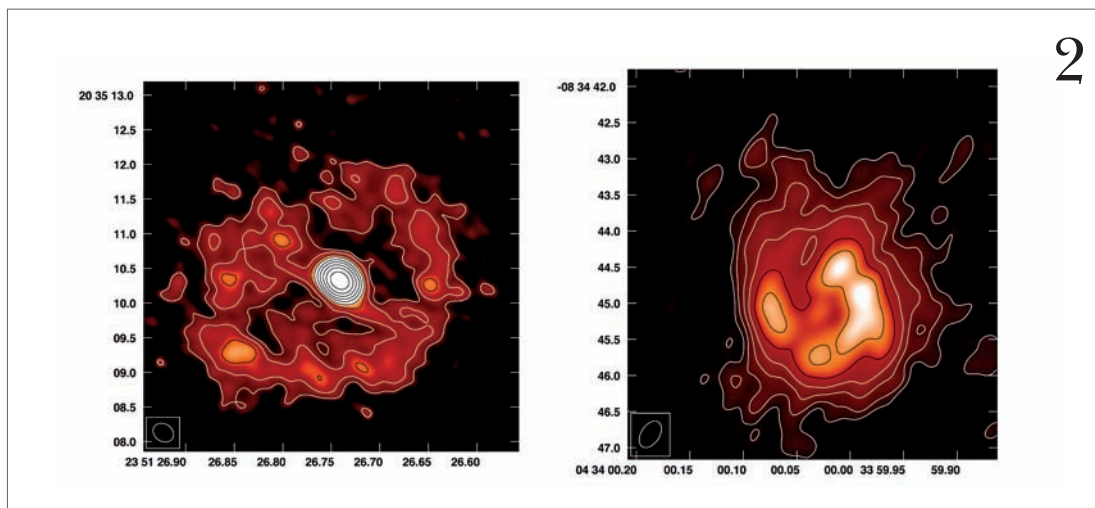
da. A longitudes de onda corta, incluida la banda visible y el infrarrojo cercano, el grosor óptico es muy grande y la emisión está fuertemente extinguida, de modo que no nos llega prácticamente nada de la emisión óptica o infrarroja del objeto. Por ello, las longitudes de onda larga (milimétricas y centimétricas) son fundamentales, ya que son capaces de atravesar el velo de extinción, permitiendo así acceder al brote de formación estelar y derivar sus propiedades básicas.

### GALAXIAS LUMINOSAS EN EL INFRARROJO, BROTES DE FORMACIÓN ESTELAR Y NÚCLEOS GALÁCTICOS ACTIVOS

Las galaxias luminosas y ultraluminosas en el infrarrojo (en inglés, *LIRGs/ULIRGs* -*(Ultra) Luminous Infra-Red Galaxies*) se llaman así porque presentan luminosidades por encima de  $10^{11}$  y  $10^{12}$  luminosidades solares, respectivamente, en la banda del infrarrojo (de 8 a 1000 micras), y que prácticamente es igual a la luminosidad bolométrica de la galaxia, es decir, la luminosidad total, sumando todas las contribuciones en todas las bandas del espectro electromagnético. Si tenemos en cuenta que una estrella como el Sol apenas irradia un 0,12 % de su emisión en la

banda del infrarrojo cercano, necesitaríamos unas  $10^{15}$  ( $10^{16}$ ) estrellas como el Sol en cada U/LIRG para explicar su emisión, valores ridículamente enormes para galaxias individuales, e incluso para cúmulos de galaxias. Por ejemplo, el cúmulo más pesado que se conoce, «El Gordo», tiene una masa estimada de  $2 \times 10^{15}$  Msol, aunque la mayor parte de su masa es en forma de gas, no de estrellas, y hay que retroceder a una edad del Universo igual a la mitad de su edad actual para encontrar monstruos así.

La cuestión es, pues, ¿cuál es el mecanismo responsable de esta extraordinaria luminosidad en el infrarrojo de las galaxias U/LIRG? Desechada –por descabellada– la idea de que la emisión infrarroja es porque hay muchas estrellas como nuestro Sol, nos quedan fundamentalmente dos explicaciones posibles. La primera consiste en suponer que esta radiación es emitida por muchas estrellas masivas. La gran cantidad de radiación ultravioleta de las estrellas masivas (y, por tanto, jóvenes) formadas durante un episodio violento de formación estelar, es reemitida en el rango infrarrojo por los granos de polvo presentes en el medio interestelar, que sufren un fuerte calentamiento por la absorción de fotones procedentes de las estrellas masivas. La segunda



**FIGURA 2**

Imágenes radio de las galaxias Mrk 331 (izquierda) y NGC 1614 de la muestra LIRG. Aunque se encuentran a más de 200 millones de años luz, gracias al uso de redes radiointerferométricas podemos ver en detalle sus regiones centrales, que muestran evidencia de anillos circumnucleares de formación estelar. (Cortesía de los autores)

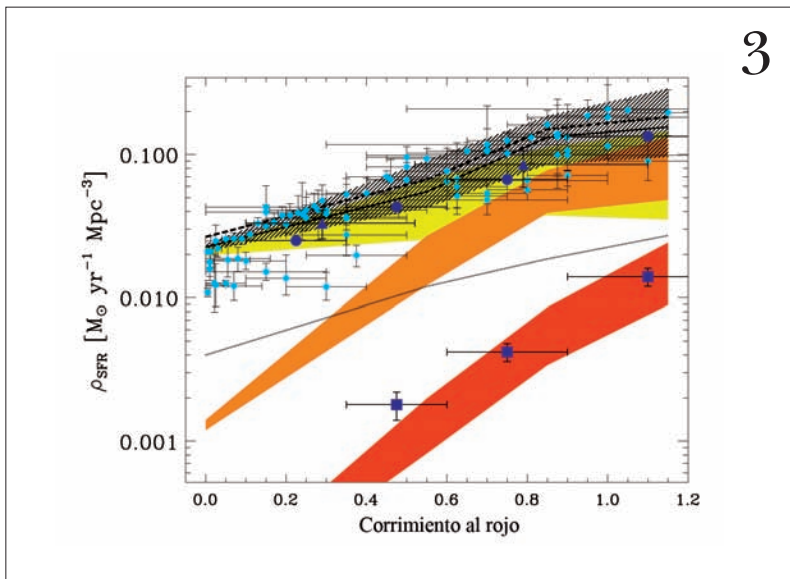
opción pasa por suponer la existencia de un agujero negro supermasivo, y activo, en el centro de la galaxia. De hecho, sabemos desde hace más de una década que prácticamente todas las galaxias albergan un agujero negro supermasivo en su región central. Por ello, lo más importante es aquí el adjetivo: *activo*. Un núcleo galáctico activo (AGN, *Active Galactic Nucleus*) es la prueba evidente de un agujero negro supermasivo despierto, que está engullendo material de sus alrededores. El AGN crea en su entorno un disco de acrecimiento del material que cae para alimentar al agujero negro. Este disco tiene una temperatura muy elevada, por lo que emite ingentes cantidades de radiación ultravioleta. Como en el caso de las estrellas masivas, la emisión ultravioleta calienta el polvo que se encuentra en las cercanías del AGN y reemite esa emisión a longitudes de onda del infrarrojo. Así pues, tanto un AGN como un brote de formación estelar (o una combinación de AGN y brote) pueden explicar, en principio, la enorme radiación infrarroja de las U/LIRGs, lo que las convierte en las mejores candidatas para albergar estallidos violentos de formación estelar.

Si por un momento suponemos que la contribución del AGN a la luminosidad infrarroja global de una U/LIRG es despreciable, y que la mayor parte de la energía emitida por las estrellas jóvenes del brote se emplea en calentar el polvo interestelar, podemos estimar la tasa de formación estelar para estrellas masivas a partir de la luz que emiten en el infrarrojo. Por ejemplo, una galaxia LIRG con  $10^{11}$  Lsol tiene una tasa de formación estelar de más de 17 Msol por año (la Vía Láctea tiene una tasa de entre 0,7 y 1,4 Msol/año) y esta tasa aumenta linealmente con la luminosidad in-

frarroja, de modo que las ULIRGs producen más de 170 Msol/año en estrellas. Por otro lado, la tasa de explosión de supernovas es también directamente proporcional a la formación estelar. Así, para nuestra Galaxia se espera aproximadamente una supernova cada 50-100 años, mientras que una LIRG produce entre una y nueve supernovas cada tres años y una ULIRG más de tres supernovas por año, lo que las convierte en verdaderas factorías de estrellas masivas y supernovas en el Universo. En un contexto astrofísico amplio, la mayor importancia de este tipo de galaxias radica en que, a altos desplazamientos al rojo (es decir, en el Universo temprano), las U/LIRGs son mucho más numerosas que en el Universo local ( $D < 1500$  millones de años luz), llegando a dominar la tasa de formación estelar. Así pues, el estudio de las U/LIRGs en el Universo local es muy importante para entender lo que sucedió en el Universo temprano.

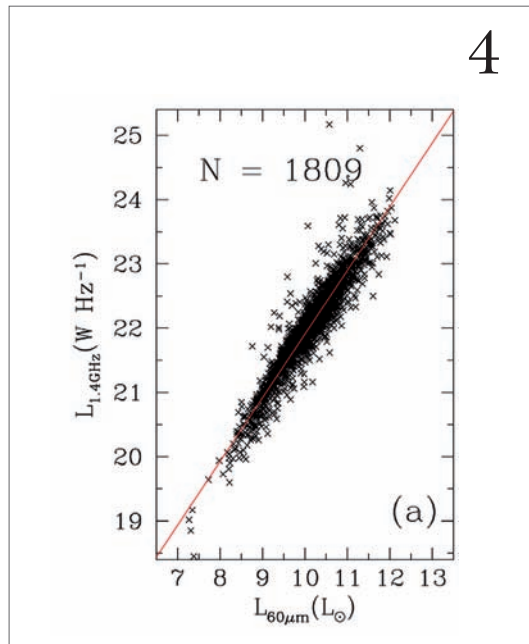
### **CORRELACIÓN ENTRE LA EMISIÓN RADIO Y LA EMISIÓN INFRARROJA. RADIOSUPERNOVAS**

En la sección anterior hemos explicado el origen de la luminosidad infrarroja en las U/LIRGs. Desde hace algo más de tres décadas se sabe también de la existencia de una fuerte correlación entre la luminosidad a longitudes de onda centimétricas y la luminosidad infrarroja de las galaxias. Esta correlación se explica por el hecho mencionado anteriormente de que, por una parte, si tenemos estrellas masivas formadas recientemente, estas emiten enormes cantidades de radiación ultravioleta, que es reemitida a longitudes de onda infrarrojas debido a la ingente cantidad de polvo que existe alrededor de las estrellas. Por otra



**FIGURA 3**

Contribución de las galaxias a la densidad de formación estelar. En el Universo local, la contribución de galaxias normales (en amarillo) domina claramente sobre las galaxias luminosas en el infrarrojo (LIRGs, en naranja; ULIRGs, en rojo). A medida que avanzamos hacia el Universo temprano, las galaxias U/LIRGs dominan la formación estelar. (Magnelli, A&A)



parte, las estrellas con una masa inicial superior a las 8 Msol explotan como supernovas a los pocos millones de años de su nacimiento, emitiendo enormes cantidades de radiación radio-sincrotrón a longitudes centimétricas en forma de radiosupernovas y remanentes de supernovas. Este tipo de radioemisión surge siempre que hay partículas relativistas (con velocidades cercanas a la de la luz), típicamente electrones, en presencia de campos magnéticos. El campo magnético fuerza al electrón a seguir las líneas de campo y, al acelerarse constantemente (la rapidez del electrón no necesita cambiar, basta el cambio continuo de dirección que se ve obligado a realizar), emite esta característica emisión radio. La radiación sincrotrón es de tipo no-térmico, ya que la temperatura característica de la emisión está desacoplada de la tempera-

3

tura del plasma térmico en que se encuentran las partículas relativistas.

Dado que las estrellas con masas igual o mayores que 8 Msol son las responsables de la mayor parte de la luminosidad infrarroja global de una U/LIRG, y puesto que todas ellas finalizan su vida como supernovas, podemos utilizar la detección de supernovas en longitudes de onda de radio (radio-supernovas) para medir la actividad reciente de la formación estelar en U/LIRGs. En efecto, el ritmo de explosión de supernovas es un trazador directo de la tasa de formación de estrellas masivas y, suponiendo una función inicial de masas (IMF, del inglés *Initial Mass Function*) para las estrellas, nos proporciona la tasa total de formación de estrellas. De hecho, existe una relación empírica entre la luminosidad en el infrarrojo lejano (debido a la emisión del polvo intergaláctico calentado por el campo de radiación) y el ritmo de explosión de supernovas. En ese sentido, las LIRGs son excelentes candidatas para ser consideradas las *fábricas* o *factorías de supernovas* más eficientes en el Universo local. Por otro lado, la emisión térmica en radio continuo, emisión libre-libre que proviene de las regiones H II de gas ionizado, nos da una medida adicional de la tasa de formación estelar.

El uso de observaciones a longitudes de onda radio es particularmente útil en el estudio de las regiones centrales de las *galaxias starburst*, donde hay muchísimo polvo. En estas condiciones, la extinción de la emisión óptica de las supernovas es tan grande que su detección en el óptico es imposible. Incluso a longitudes de onda del infrarrojo cercano, donde la extinción es casi diez veces menor, resulta a menudo infructuosa, de ahí la importancia de observarlas a longitudes de onda radio: de una parte, no existe el problema de extinción en el óptico y, de otra parte, las supernovas se mantienen durante más tiempo brillantes a longitudes de onda radio que en la banda óptica.

Sin embargo, la resolución angular de los telescopios, es decir, la capacidad para resolver con detalle estructuras muy cercanas entre sí, es muy pobre comparada incluso con el telescopio óptico más pequeño, por lo que sería imposible distinguir supernovas individuales en cualquier galaxia U/LIRG del Universo usando radiotelescopios de modo individual. Para detectar radiosupernovas individua-

4

les necesitamos mejorar la resolución angular de nuestras observaciones. Gracias a la radiointerferometría de muy larga base (VLBI, por sus siglas en inglés) podemos alcanzar resoluciones angulares de milisegundos de arco y cartografiar la población de radiosupernovas. La técnica de VLBI consiste en observar un mismo objeto con varias radioantenas separadas hasta por varios miles de kilómetros, de modo que la resolución angular fuera la de un telescopio de tamaño equivalente a la distancia entre las antenas más alejadas. Para hacernos una idea, con una resolución de 1 milisegundo de arco veríamos desde la Tierra a una persona tumbada sobre la superficie de la Luna, o en el caso de una galaxia a más de 100 millones de años luz, distinguiríamos perfectamente dos objetos separados por apenas 3 años luz.

Gracias a los estudios de VLBI, hemos podido detectar las supernovas individuales en galaxias U/LIRGs. Y repitiendo estos estudios en diversas épocas, hemos podido determinar el ritmo con el que aparecen

## Para detectar radiosupernovas individuales necesitamos mejorar la resolución angular de nuestras observaciones, cosa que es posible gracias a la radiointerferometría de muy larga base o VLBI

nuevas supernovas e inferir la tasa de formación estelar. El análisis de estas factorías de supernovas también nos da una información muy importante sobre la función inicial de masas, que indica las proporciones relativas de estrellas que hay de cada masa: las supernovas tipo II<sub>n</sub>, con una progenitora en el rango de 23 a 150 masas solares, producirán fuentes compactas muy luminosas; en cambio, las supernovas tipo II<sub>p</sub> (masas de 8,5 a 18 masas solares) y las tipo III (masas de 18 a 23 masas solares) resultarán en fuentes radio menos luminosas. Midiendo la distribución en luminosidad de las radio supernovas, podemos trazar cómo ha sido la función inicial de masas. Y de hecho, para una galaxia ULIRG arquetípica como es Arp 220 y para una galaxia LIRG como es Arp 299A, en las que se han cartografiado en gran detalle la factoría

de supernovas, parece que su IMF muestra preferencia por generar estrellas muy masivas, lo que técnicamente se conoce como *top heavy IMF*. Asimismo, podemos caracterizar la edad de los remanentes estelares a partir de su información espectral, es decir, a partir de la forma en que la energía emitida por una radiofuente se distribuye a lo largo de un amplio rango de frecuencias.

### DE M 82 A ARP 220, PASANDO POR ARP 299

El prototipo de galaxia *starburst* es la Galaxia del Cigarro (M 82) en la constelación de la Osa Mayor. A una distancia de 11,4 millones de años luz es el *starburst* más cercano. M 82 no es realmente una LIRG, pues tiene una luminosidad infrarroja de apenas  $3,6 \times 10^{10}$  L<sub>sol</sub>, pero muestra un potente brote de formación estelar en una región de unos 1300 años luz alrededor de su núcleo, responsable de la mayor parte de la luminosidad infrarroja de la galaxia. En esta región se han detectado más de cincuenta remanentes de supernova y varias

radiosupernovas jóvenes, la más reciente en 2008 (SN 2008iz). Mediante observaciones de alta resolución angular se han podido determinar la distribución, luminosidad, tamaños, índice espectral y, en algunos casos, la velocidad de expansión angular de los remanentes. La tasa de explosión de supernovas es aproximadamente de una supernova cada catorce años y su tasa de formación estelar es de 1,8 Msol por año. Hacemos notar aquí que, a finales de febrero de

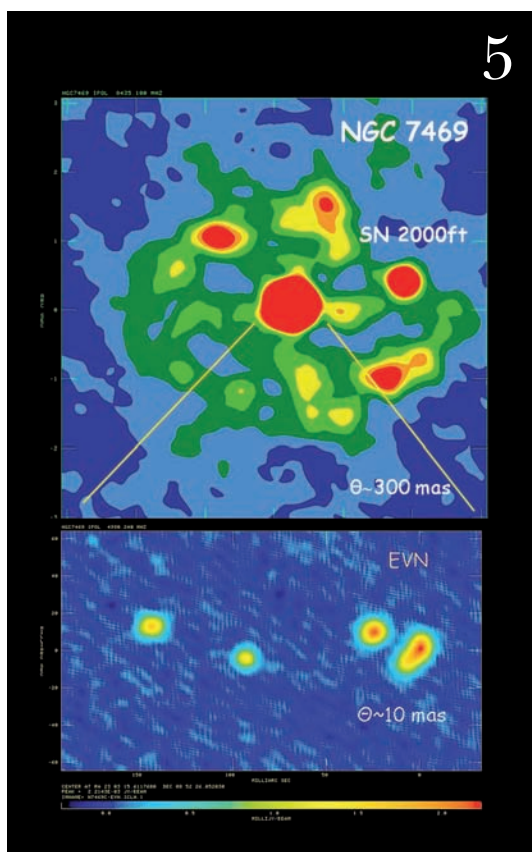
2014, M 82 fue noticia por la explosión de la SN 2014J, la supernova de tipo Ia más cercana en casi treinta años. Las supernovas de tipo Ia, que proceden de la explosión de una enana blanca (M = 1,4 Msol) emiten muy poco, quizá nada, a longitudes de onda radio. Las supernovas a las que nos referimos en este artículo proceden de la muerte de estrellas muy masivas (al menos ocho veces la masa del Sol), que colapsan sobre sí mismas, lo que genera una onda de choque que acaba expulsando el material de las capas más externas a velocidades de 10 000 km/s (36 millones de km/h) o más. La interacción de este material a gran velocidad con el material circundante, cuyas velocidades son típicamente de 10-20 km/s, da como resultado una capa de elevada densidad, y es en esta capa donde se genera la emisión radiosincrotrón que ob-

### FIGURA 4

La práctica totalidad de las galaxias en el Universo siguen esta correlación empírica: a mayor luminosidad infrarroja, mayor su luminosidad en radio. Esta relación se utiliza ampliamente para determinar las tasas de formación de estrellas en galaxias. (Yun, ApJ)

**FIGURA 5**

Imágenes radio de la región central de la galaxia LIRG NGC 7469, donde una luminosa supernova explotó el año 2000 (panel superior). El panel inferior corresponde a 150 años luz centrales de la galaxia, donde nuestras observaciones radiointerferométricas muestran evidencia de un brote de formación estelar. (Cortesía de los autores)



servamos en las imágenes.

En el otro extremo de galaxias luminosas en el infrarrojo tenemos a Arp 220, que es el prototipo de galaxia ULIRG ( $1,3 \times 10^{12}$  Luminosidades solares). De hecho, es la ULIRG más cercana, a «apenas» 250 millones de años luz de distancia. Se han realizado observaciones radiointerferométricas con alta resolución angular (equivalentes a

Arp 299, un sistema de dos galaxias en interacción, cuya emisión global está dominada por la radiación infrarroja ( $6,5 \times 10^{11}$  Lsol). En nuestro proyecto de investigación, el objetivo inicial que nos marcamos se centraba en obtener de modo directo, independientemente de los modelos, la tasa de explosión de supernovas en la región nuclear de Arp 299A, que a su vez está directamente relacionada con la tasa de formación estelar de estrellas masivas. Escogimos el núcleo A porque la mitad de la emisión infrarroja y casi el 70 % de la emisión radio proceden de esa región, por lo que la tasa esperada de supernovas era de prácticamente una supernova por año. Observamos con la red del EVN (*European Very-Long-Baseline-Interferometry Network*) en abril y diciembre de 2008 y lo que encontramos fue espectacular: una verdadera fábrica de supernovas y remanentes de supernova. Más de veinte objetos en una región de apenas 450 luz de diámetro, y todos ellos con luminosidades típicas de supernovas (1).

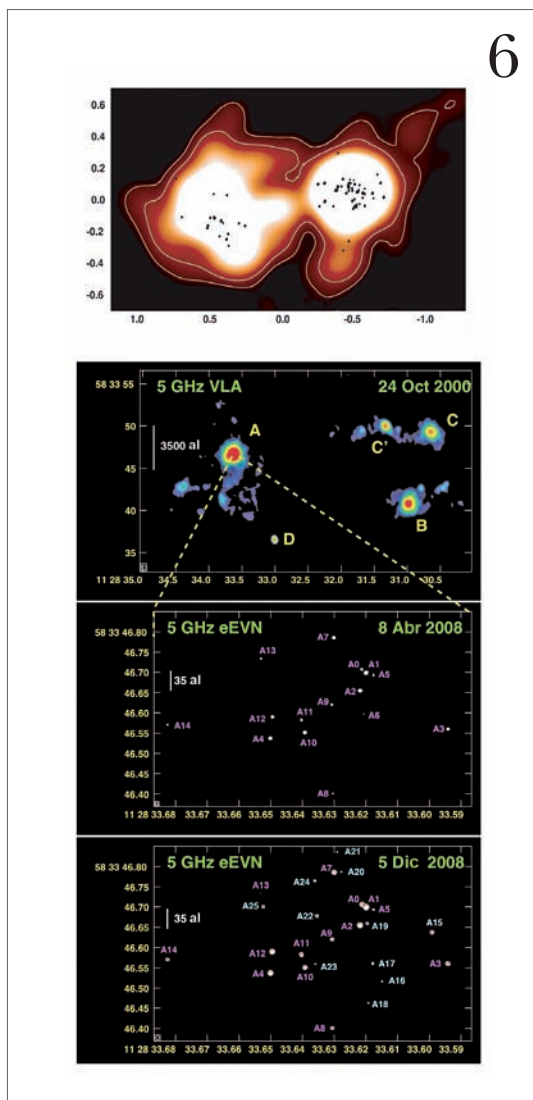
A raíz de este descubrimiento, propusimos un seguimiento de esta región con la red del EVN y, entre otros resultados, descubrimos la localización exacta del agujero negro de Arp 299A (2), que se halla rodeado de supernovas. De hecho, una supernova explotó a tan solo 7 años luz del agujero negro. Este agujero negro emite menos del 10 % de la luminosidad de esta galaxia. A principios de 2012 publicamos la evolución

## El objetivo global del proyecto LIRGI consiste en el establecimiento de una secuencia fenomenológica y una escala temporal de la evolución de un brote de formación estelar en las regiones centrales de las galaxias estudiadas

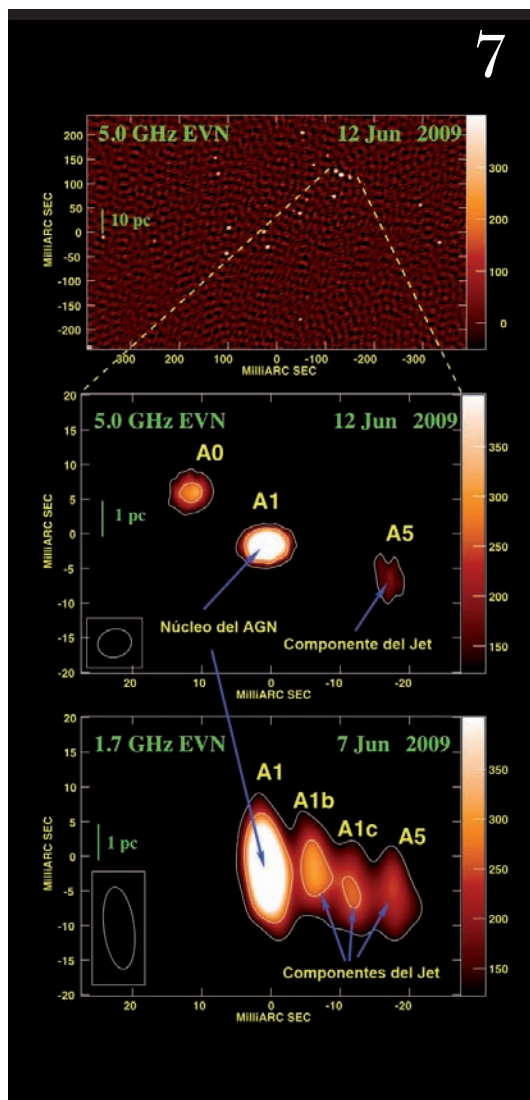
una resolución lineal de apenas 3 años luz) que demuestran que la región central contiene más de cuarenta y nueve fuentes puntuales, que han sido interpretadas como radiosupernovas y remanentes de supernovas. La luminosidad de Arp 220 puede explicarse a partir de *starbursts*, sin recurrir a la presencia de un AGN, con un ritmo de explosión de supernovas de aproximadamente cuatro supernovas por año, que equivalen a una tasa de formación estelar de 220 masas solares por año.

Entre ambos extremos tenemos la LIRG

temporal de las fuentes en Arp 299A durante dos años y medio (3) y dimos nuestra primera estimación del valor de la tasa de supernovas, que situamos en 0,80 supernovas por año. Teniendo en cuenta que no somos sensibles a supernovas muy débiles, y que solo estamos viendo las supernovas de la región nuclear, esto sugiere un claro desajuste entre las predicciones y nuestras observaciones, aunque para obtener conclusiones definitivas sería necesario disponer de un mayor número de observaciones.



6



7

FIGURA 6

Imágenes radio de las galaxias U/LIRGs Arp 220 (arriba) y Arp 299 (abajo). La imagen de Arp 299 muestra en los tres paneles las regiones más luminosas de la galaxia. La región es una auténtica factoría de supernovas. La imagen de Arp 220 muestra la emisión difusa, así como la emisión compacta de supernovas y remanentes de supernovas (puntos negros). (Conway, JBCA/NRAO/JIVE)Curve Plotter)

FIGURA 7

Imágenes radio de la región A en Arp 299 (ver Figura 6), obtenidas con la red europea del EVN, que nos permitieron identificar el AGN de la galaxia. El objeto A0 corresponde a una supernova descubierta el año 2002, y que sigue siendo brillante pasados seis años desde su explosión. (Cortesía de los autores)

Nuestros datos de Arp 299A también nos han servido para mostrar la evidencia de discos nucleares en galaxias con brotes de formación estelar, y encontramos que la densidad superficial de supernovas disminuye de modo inversamente proporcional a la distancia (4). Estos resultados dan apoyo a algunos modelos teóricos donde los estallidos de formación estelar en las vecindades de un agujero negro supermasivo formarían un disco, y cuya densidad de formación estelar, y, por tanto, de supernovas, caería con el inverso de la distancia al centro.

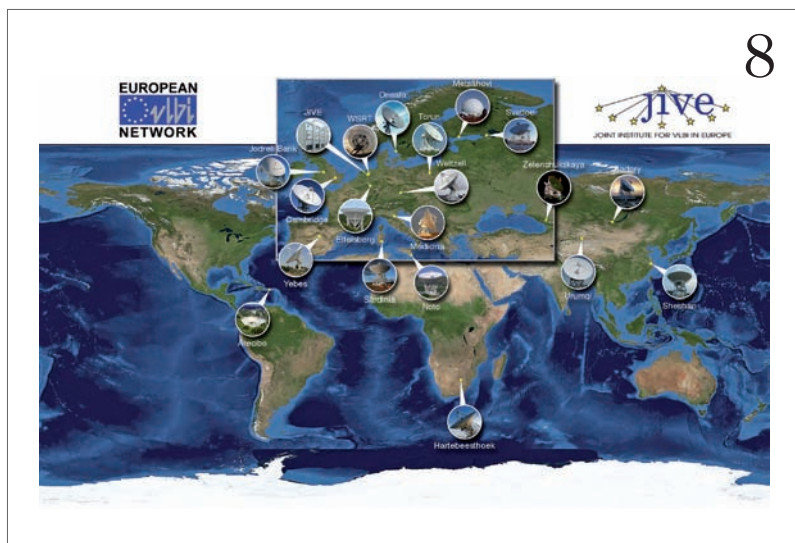
También hemos obtenido espectaculares resultados en otras zonas nucleares de Arp 299, entre los que destaca el núcleo Arp 299B, donde mediante el análisis de datos de múltiples épocas de observación hemos encontrado evidencia de la explosión de varias supernovas, indicando una tasa de explosión de aproximadamente 0,4 supernovas por año (5). Asimismo, en las cercanías del núcleo C' detectamos en 2012 la contrapartida en radio de una supernova que explotó en 2010 (5,6), que se descu-

brió inicialmente en el infrarrojo, y que tardó mucho en aparecer en la banda radio.

### LIRGI: UNA MUESTRA DE LIRGS EN EL UNIVERSO LOCAL VISTAS CON OJOS RADIO

Desde el Instituto de Astrofísica de Andalucía lideramos, junto con el grupo del Observatorio de Onsala, en Suecia, un proyecto internacional cuyo objetivo es el estudio de una muestra de cuarenta y dos de las galaxias LIRG/ULIRG más brillantes del Universo local ( $D < 800$  millones de años luz) con alta resolución angular radio (0,05" – 0,15") a las longitudes de onda de 6 y 18 cm, con el radiointerferómetro eMERLIN (*Electronic Multi-Element Remotely Linked Interferometer Network*). Esta muestra es parte de una muestra mayor de galaxias LIRGs que se han observado dentro del programa de la NASA *Great Observatories All-Sky Survey* (GOALS), por lo que existen observaciones en el infrarrojo, óptico, ultravioleta y en rayos X, pero que carecen de observaciones





**FIGURA 8**

Muchas de las imágenes de este artículo se han obtenido con las redes interferométricas eMERLIN (*Electronic Multi-Element Remotely Linked Interferometer Network*), y en especial con la red europea de radiointerferometría intercontinental (EVN), a cuyos comités de evaluación de tiempo de telescopio agradecemos la generosa concesión de tiempo de observación. (JBCA/JIVE)

con alta resolución angular radio. La muestra, que se llama LIRGI (ver [www.lirgi.iaa.es](http://www.lirgi.iaa.es) para detalles) engloba galaxias U/LIRGs con luminosidades en el infrarrojo por encima de  $2,5 \times 10^{11}$  Lsol, y su densidad superficial de formación estelar, así como las densidades del gas y de los campos de radiación, son similares a las de galaxias con alta tasa de formación estelar del Universo temprano.

Entre los objetivos específicos del proyecto resaltamos los siguientes:

- ▶ Obtención de imágenes radio a 6 y 18 cm para trazar en detalle la escala y morfología de la emisión difusa de las fuentes. A escalas del segundo de arco, la emisión en radio de estas galaxias se espera que esté dominada por la emisión sincrotrón difusa debido a la presencia de partículas cargadas (electrones, principalmente), que son aceleradas en presencia de campos magnéticos. Las observaciones a dos longitudes de onda nos permitirán caracterizar el medio interestelar de estas galaxias con un detalle sin precedente.
- ▶ Detección de radiosupernovas para determinar la tasa de explosión de supernovas y la de formación de estrellas masivas, y constreñir la función inicial de masas y/o la edad del brote de formación estelar.
- ▶ Caracterización del campo magnético en estas galaxias mediante estudios de polarización, a partir de las observaciones a 6 y 18 cm. Más específicamente, queremos saber si el campo magnético interestelar es débil y en equipartición con las partículas relativistas, o bien es potente y está en equipartición con el gas térmico interestelar.
- ▶ Estudio sistemático de la dinámica del gas y sus condiciones físicas a partir de ob-

servaciones de máseres de línea espectral.  
 ▶ Obtener imágenes de las regiones centrales. El objetivo principal consiste en determinar el mecanismo dominante en el calentamiento del polvo (brotes intensos de formación estelar vinculados a explosiones de supernova, la presencia de un AGN, o ambos) en las regiones nucleares y circumnucleares de las galaxias de la muestra.

El objetivo global del proyecto va más allá de los objetivos específicos, y consiste en el establecimiento de una secuencia fenomenológica y una escala temporal de la evolución de un brote de formación estelar en las regiones centrales de las galaxias, combinando la información existente a otras longitudes de onda junto con las observaciones radio (continuo y línea espectral) de alta resolución angular obtenidas con LIRGI. Este proyecto, una vez finalizado, dejará un importante legado para toda la comunidad científica, ya que servirá de referencia para futuros estudios con la generación presente y futura de instrumentación radio (JVLA, eMERLIN, EVN, LOFAR, SKA), milimétrica (PdBI, SMA, ALMA) e infrarroja (Herschel). (A)

**REFERENCIAS:**

- (1) Pérez-Torres et al. 2009, A&A, 507, L17.
- (2) Pérez-Torres et al. 2010, A&A, 519, L5.
- (3) Película en [www.iaa.es/~torres/research/arp299a-the-movie.mov](http://www.iaa.es/~torres/research/arp299a-the-movie.mov). Referencia: Bondi, Pérez-Torres, Herrero-Illana, Alberdi 2012, A&A, 539, 134.
- (4) Herrero-Illana, Pérez-Torres & Alberdi 2012, A&A, 540, L5.
- (5) Herrero-Illana, Romero-Cañizales, Pérez-Torres et al. 2012, Atel No. 4432.
- (6) Romero-Cañizales, Mattila, Alberdi et al. 2011, MNRAS, 415, 2688.
- (7) Romero-Cañizales, Herrero-Illana, Pérez-Torres et al. 2014, MNRAS, 440, 1067.
- (8) Romero-Cañizales, Pérez-Torres, Alberdi et al. 2012, A&A, 543, 72.
- (9) Romero-Cañizales, Pérez-Torres & Alberdi 2012, MNRAS, 422, 510.

**Miguel Ángel Pérez-Torres** ([tores@iaa.es](mailto:tores@iaa.es)) es científico titular del Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC).



**Antxon Alberdi Odriozola** es Profesor de Investigación también en el IAA.

