

Este artículo aparecerá publicado en el Anuario del Real Observatorio de Madrid para el año 2017.

## **Luchas de titanes: interacciones y fusiones de galaxias**

**Almudena Alonso Herrero**

*Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)  
ESAC Campus, 28692 Villanueva de la Cañada, Madrid*

### **Abstract**

Interacting galaxies and mergers are one of the most spectacular events of the Universe that can produce fundamental morphological transformations in galaxies. Moreover, galaxy interactions and mergers give rise to intense periods of star formation activity, active galactic nuclei including quasars, the formation of super-star clusters, and may be responsible for the formation of elliptical galaxies. In this article we briefly touch on all these aspects from both an observational and numerical simulation point of view. We give a concise historic perspective and also summarize some results in the Local Universe.

### **Introducción**

Cuando uno piensa en algunas de las imágenes más espectaculares de galaxias, inmediatamente nos vienen a la mente esas *luchas de titanes* que son las interacciones y fusiones entre algunas de ellas. En la figura 1 se muestran algunos ejemplos obtenidos con dos de los instrumentos ópticos del telescopio espacial Hubble. Las interacciones o choques de galaxias son efectivamente fenómenos muy energéticos que ocurren en escalas de tiempo muy grandes, varios centenares de millones de años, que producen consecuencias fundamentales en la evolución de galaxias.

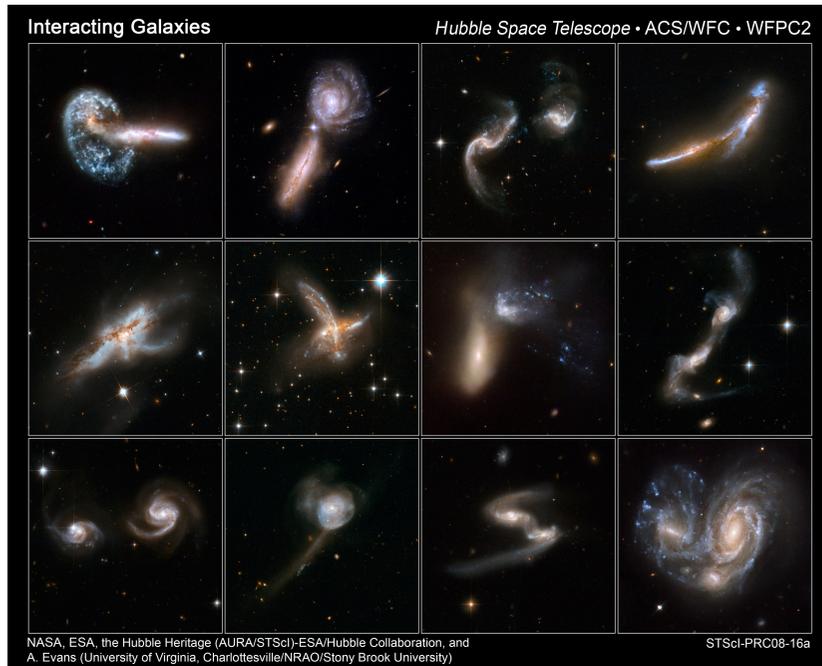


Figura 1: Imágenes tomadas con el telescopio espacial Hubble de interacciones y fusiones de galaxias, todas ellas clasificadas como LIRGs y ULIRGs (ver texto para su definición). Las observaciones se obtuvieron en varios filtros ópticos con los instrumentos WFC2 y ACS. Los colores más rojos indican longitudes de onda más largas. Créditos: NASA, ESA, Colaboración Hubble-ESA y A. Evans (Universidad de Virginia/NRAO/Universidad Stony Brook).

Como veremos a lo largo de este artículo, las interacciones y fusiones de galaxias producen transformaciones fundamentales en las morfologías de las mismas y son la base del modelo cosmológico jerárquico de la formación y evolución de galaxias. Durante estos procesos se transportan grandes cantidades de gas (muchas veces vistas en forma de filamentos y puentes de materia en las zonas de solapamiento) y polvo (visto en imágenes ópticas como bandas oscuras) desde los discos de las galaxias hacia sus regiones centrales. Cuando este gas se ve comprimido se generan intensos procesos de formación de nuevas generaciones de estrellas en los puentes de materia entre las galaxias y también en las colas de marea generadas en las zonas externas de las galaxias o de la galaxia fusionada. En estos procesos se forman cúmulos estelares jóvenes y en algunos casos incluso galaxias enanas en las colas de marea. Todas estas características morfológicas que resultan del choque de galaxias se pueden observar

claramente en los ejemplos de la figura 1. Finalmente, si las galaxias inicialmente son muy masivas y contienen grandes cantidades de gas también se pueden dar fenómenos de actividad nuclear intensa. En estos procesos los agujeros negros supermasivos que inicialmente contienen los centros de las galaxias o el agujero negro supermasivo fusionado acretan grandes cantidades de gas. Durante estos periodos los centros de estas galaxias pueden presentar grandes luminosidades que incluso pueden dominar en brillo sobre la luz emitida por las estrellas de la galaxia y son clasificadas como cuásares<sup>1</sup> u otros tipos de galaxias activas o AGN (por sus siglas en inglés, *active galactic nuclei*).

Claramente la interacción de galaxias abarca una gran diversidad de fenómenos y es muy posible que la mayor parte de las galaxias del Universo haya experimentado en algún momento de su evolución una interacción con otra galaxia o incluso varias galaxias. Por ejemplo, imágenes muy profundas de galaxias de tipos tempranos e incluso galaxias espirales en nuestro Universo Local (ver la figura 2) que en principio parecen estar aisladas pueden mostrar los rasgos característicos de interacciones pasadas como son colas de marea que contienen estrellas. Incluso nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, empezará probablemente a fusionarse con nuestra vecina la galaxia espiral Andrómeda (Messier 31 o M31) en unos 4 000 millones de años y el proceso de fusión terminará formando una galaxia elíptica gigante al cabo de 10 000 millones (ver el artículo de Santiago García Burillo publicado en este Anuario en el año 2016).

Debido a la amplitud del tema, en este artículo nos centraremos fundamentalmente en los procesos de interacción y fusión de galaxias que se observan en nuestro Universo Local tanto desde el punto observacional como desde el punto de vista de las simulaciones numéricas realizadas con ordenadores para intentar modelar estos procesos.

## Perspectiva histórica de los inicios del estudio de la interacción de galaxias

Sin pretender que esta sección sea exhaustiva, sí que es de interés describir algunos de los hitos históricos más relevantes para entender cómo nuestro conocimiento sobre las interacciones de galaxias ha evolucionado a lo largo de los dos últimos siglos. En el siglo XIX, mucho antes de que los astrónomos supieran que algunas de las *nebulosas* que observaban con sus telescopios eran realmente galaxias externas a nuestra Vía Láctea, ya se apreció que algunas de estas nebulosas tenían compañeras. El astrónomo William Herschel en 1811 remarcó la posible existencia de nebulosas dobles.

<sup>1</sup>El origen de este término es debido a la apariencia cuasi puntual en imágenes ópticas de estos objetos, casi como estrellas. Se denominaron en inglés *quasi-stellar objects* o *quasars* (Schmidt 1963).

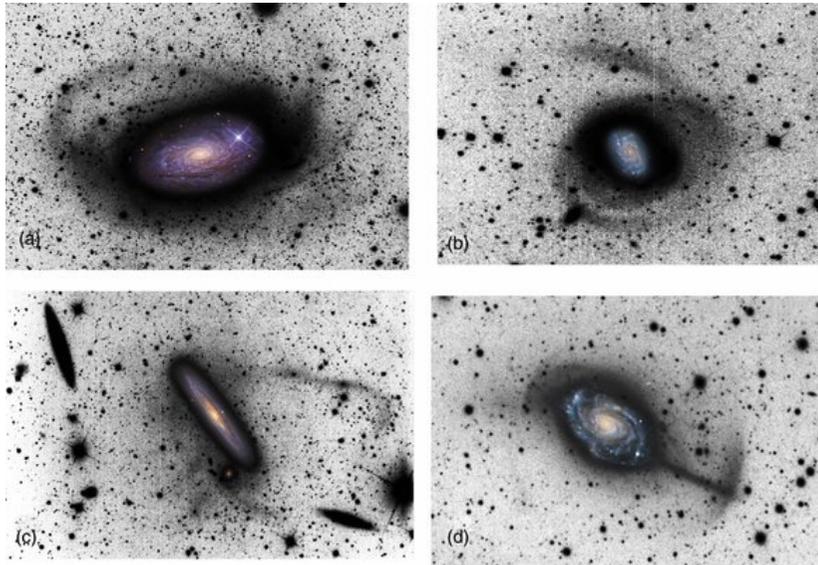


Figura 2: Imágenes muy profundas de galaxias aparentemente clasificadas como espirales en las que se aprecian grandes estructuras de luz difusa en sus zonas externas que demuestran la existencia de episodios de interacción ocurridos en el pasado. En el panel (a) se observa la corriente estelar de efecto de marea alrededor de M 63, en el panel (b) plumas gigantes alrededor de NGC 1085, en el panel (c) algunas de las galaxias satélite de NGC 4216 parecen estar sufriendo procesos de transformación morfológica por los efectos de la interacción con la galaxia principal y en el panel (d) una estructura en forma de paraguas probablemente asociada a fenómenos de marea en NGC 4651. Figura adaptada del trabajo de Martínez-Delgado et al. (2010). Cortesía de la *American Astronomical Society* (AAS).

Pero quizás la primera mención explícita a la existencia de interacciones de galaxias fuera el trabajo del Conde de Rosse publicado en 1850 en el cual observó las nebulosas del catálogo de John Herschel (el hijo de William Herschel) publicado en 1833 usando un telescopio construido por él mismo con un diámetro de 72 pulgadas (1,83 m) en el Castillo de Birr en Irlanda. En esta publicación y refiriéndose a la compañera de la galaxia M 51 y cuyo grabado se reproduce en la figura 3 nos relata: "... *The connection of the companion with the greater nebula, of which there is not the least doubt, and in the way represented in the sketch...*". Es decir, no solo sus observaciones revelaron en gran detalle la estructura espiral de M 51 sino también la clara conexión con la galaxia compañera.

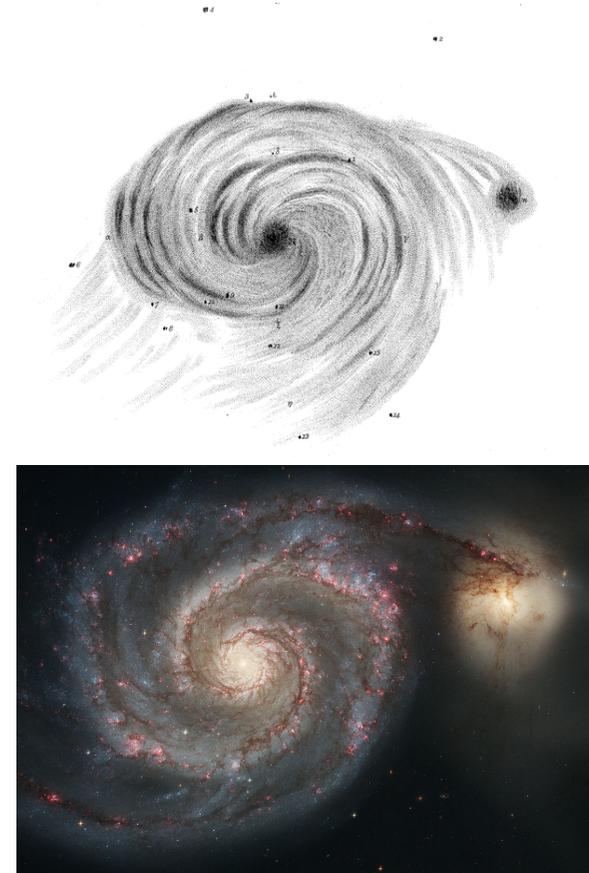


Figura 3: En el panel superior se muestra una adaptación de la ilustración de la galaxia M 51 y su compañera publicada por el Conde de Rosse (1850) y en el panel inferior una imagen moderna del mismo sistema tomada con el telescopio espacial Hubble. Créditos: Imagen superior Rosse (1850, a través de JSTOR) e imagen inferior: NASA, ESA, S. Beckwith-STSci y el *Hubble Heritage Team*.

A principios del siglo XX, en el año 1926, el astrónomo estadounidense Edwin Hubble propuso la clasificación morfológica de galaxias (Hubble 1926) conocida como la Secuencia de Hubble. Ya entonces se hizo aparente que había una pequeña fracción de objetos, aproximadamente un 3%, que no se podía clasificar como galaxias elípticas o galaxias espirales. Estas galaxias se consideraron como irregulares. A finales de los años 20 y durante los años 30 los astrónomos suecos Knut Lundmark y Erik Holmberg empezaron a realizar estudios más detallados y sistemáticos so-

bre galaxias dobles y múltiples en el Universo Local utilizando observaciones obtenidas con placas fotográficas tomadas con diferentes telescopios. Además introdujeron una definición de galaxia doble basada en la separación angular aparente de los sistemas en relación a su tamaño aparente observado. Sin embargo, durante muchos años este tipo de objetos todavía se consideraba como una *rara avis* como nos relata Curtis Struck en su artículo titulado *Galaxy Collisions* (Curtis 1999)<sup>2</sup> por astrónomos tan importantes de la primera mitad del siglo XX como Hubble, Shapley y Baade.

A partir de la segunda mitad del siglo XX los avances en la astronomía extragaláctica observacional fueron imparables gracias a la compilación de grandes catálogos de galaxias y por lo tanto en la identificación de galaxias peculiares. En la entonces Unión Soviética, Boris Vorontsov-Velyaminov y sus colaboradores publicaron el atlas de galaxias en interacción (Vorontsov-Velyaminov 1959, posteriormente ampliado en 1977) y cuyos objetos se conocen por la denominación VV. Casi al mismo tiempo, en 1961, Fritz Zwicky publicó del catálogo de galaxias y cúmulos de galaxias (CGCG por sus siglas en inglés *Catalogue of Galaxies and Clusters of Galaxies*) usando las placas fotográficas tomadas en dos filtros del *Palomar Observatory Sky Survey*. En este catálogo se vio que existía un número significativo de galaxias sufriendo procesos de interacción (Zwicky 1961). Por último, cabe resaltar la publicación de Halton Arp en 1966 del denominado catálogo de galaxias peculiares (Arp 1966), construido también a partir de la inspección detallada de las placas fotográficas de Palomar. Este compendio tuvo tal impacto que hoy en día todavía usamos la nomenclatura para estos sistemas en interacción con su nombre en este catálogo, como el par de galaxias Arp 299 que mostramos en la figura 4.

La disponibilidad de estos grandes catálogos de galaxias en interacción dio lugar también a un gran impulso en el desarrollo de simulaciones numéricas de estos fenómenos con ordenadores. Aunque no el primero, el trabajo de Toomre & Toomre (1972) sentó las bases para estos modelos teóricos y reprodujeron morfologías peculiares como colas de marea, puentes de materia entre las galaxias, etc. En particular, modelaron algunos de los sistemas en interacción más conocidos, como M 51 (figura 3) y el par de galaxias conocido como Las Antenas (figura 10) por la forma que tienen las colas de marea del sistema. Su conclusión más importante es que estas morfologías eran debidas a los efectos en las órbitas de las estrellas de fenómenos de marea que se producen durante las interacciones. Además demostraron que estos fenómenos pueden llevar a la fusión final de las dos galaxias involucradas en el choque y que esto podría también estar relacionado con la formación de las galaxias elípticas que se observan en el Universo Local. Finalmente, dedujeron que la agitación y transporte del gas durante el proceso de interacción daría lugar a la disponibilidad de

combustible que quizás fuese el responsable de la actividad tanto de formación estelar como actividad nuclear que se observa en este tipo de galaxias.

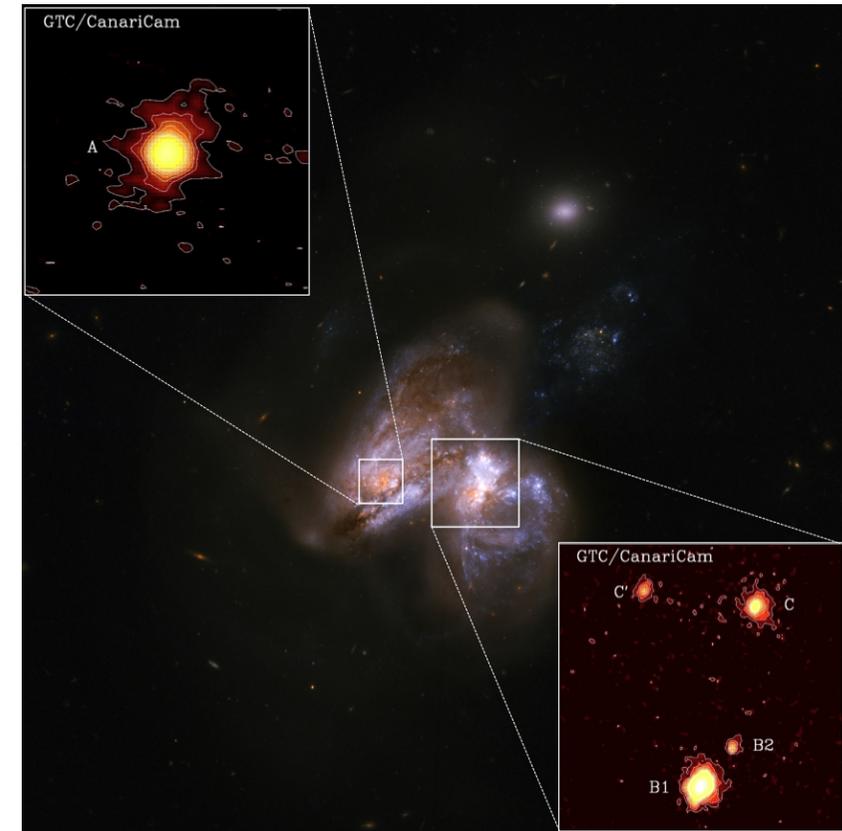


Figura 4: El sistema de galaxias en interacción Arp 299 (también conocido como VV 118), que también está clasificado como LIRG (ver definición en el texto). La imagen está tomada en dos filtros ópticos con el telescopio espacial Hubble. Los colores azulados indican regiones donde están teniendo lugar procesos de formación de nuevas estrellas mientras que los colores rojizos indican la presencia de grandes cantidades de polvo. Las imágenes pequeñas se obtuvieron con el Gran Telescopio CANARIAS (GTC) utilizando el instrumento CanariCam en el infrarrojo medio ( $8,7\mu\text{m}$ ) para buscar emisión de núcleos activos (AGN) en los centros de las dos galaxias (denominados en esta figura como fuentes “A” y “B1”) que forman este sistema (Alonso-Herrero et al. 2013). Créditos de las imágenes: NASA y *Hubble Space Telescope*, y Gran Telescopio Canarias (GTC) y A. Alonso Herrero.

<sup>2</sup>Este artículo también se puede acceder on-line en: <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Struck/frames.html>

A continuación se describen de manera breve algunos de los fenómenos asociados con las interacciones y fusiones de galaxias así como los avances en el campo teórico para entender estos procesos.

## Episodios de formación estelar intensa

Desde el punto de vista observacional hay numerosas indicaciones de la relación entre interacciones y la presencia de formación estelar activa. El estudio pionero de Larson & Tinsley (1978) demostró que los colores ópticos de galaxias peculiares cuando se comparan con los de galaxias morfológicamente clasificadas como normales se pueden explicar como debidos a episodios recientes (ocurridos en escalas de tiempo de menos de  $2 \cdot 10^7$  años) de formación estelar usando sus propios modelos de síntesis evolutiva de poblaciones estelares. Otro avance fundamental se produjo con el lanzamiento del satélite infrarrojo IRAS en el año 1983, que permitió catalogar un gran número de galaxias que emiten la mayor parte de su energía en los cuatro filtros utilizados a 12, 25, 60 y  $100 \mu\text{m}$ . En particular, las galaxias clasificadas como luminosas y ultraluminosas infrarrojas (LIRGs y ULIRGs, por sus siglas en inglés), con luminosidades en el rango espectral infrarrojo  $8\text{--}1000 \mu\text{m}$   $L_{\text{IR}} = 10^{11}\text{--}10^{12} L_{\odot}$ <sup>3</sup> y  $L_{\text{IR}} > 10^{12} L_{\odot}$ , en el Universo Local están formando una gran cantidad de estrellas. Además una gran mayoría de ellas también contiene un núcleo activo en sus centros. Si se supone que la emisión infrarroja de estos objetos se debe a emisión de polvo calentado por estrellas jóvenes y masivas entonces sus luminosidades infrarrojas se pueden transformar en tasas de formación estelar (SFR, por sus siglas en inglés *star formation rate*). Se obtienen SFR entre 14 y  $140 M_{\odot}$  por año<sup>4</sup> para las LIRGs y entre 140 y  $1\,400 M_{\odot}$  por año para las ULIRGs. Como referencia nuestra galaxia tiene una SFR estimada de  $1\text{--}2 M_{\odot}$  por año. Otro resultado fundamental es que los sistemas más luminosos con  $L_{\text{IR}} > 3 \cdot 10^{11} L_{\odot}$  están prácticamente en su totalidad asociados con galaxias en interacción y objetos ya fusionados (ver Sanders & Mirabel 1996 para un artículo de revisión sobre las propiedades de este tipo de galaxias y las figuras 1 y 4 para varios ejemplos de LIRGs y ULIRGs). Sin embargo, es importante resaltar que las galaxias clasificadas como LIRG y ULIRG son poco numerosas en el Universo Local aunque su abundancia aumenta de manera significativa para edades más jóvenes del Universo.

En la actualidad se pueden estudiar grandes muestras de galaxias en interacción gracias a los cartografiados astronómicos que se realizan de áreas extensas del cielo y con profundidades mayores, lo que nos permite estudiar estos procesos no solamente en el Universo Local sino también en épocas más tempranas en la vida del Universo. Uno de los proyectos

<sup>3</sup>Una luminosidad solar ( $1 L_{\odot}$ ) equivale a  $3,83 \cdot 10^{26}$  W.

<sup>4</sup>Una masa solar ( $1 M_{\odot}$ ) equivale a  $1,99 \cdot 10^{30}$  kg.

más ambiciosos en la actualidad es el cartografiado denominado *Sloan Digital Sky Survey* o SDSS (<http://www.sdss.org>). Desde 2000 y utilizando un telescopio de 2,5 m de diámetro situado en el Observatorio de Apache Point (Nuevo México, EEUU) SDSS está obteniendo imágenes y espectros ópticos de millones de galaxias. Esto permite seleccionar muestras de galaxias en interacción con diferentes propiedades para realizar estudios estadísticos de los efectos de la interacción.

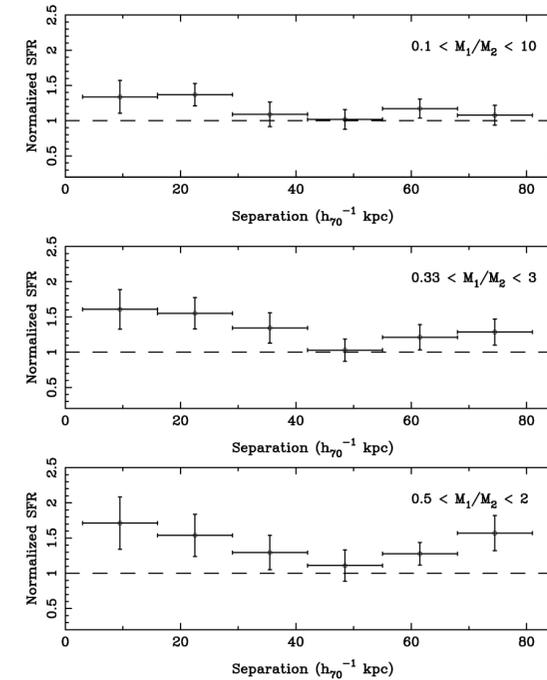


Figura 5: Observaciones de la tasa de formación estelar (SFR) de pares de galaxias en SDSS relativa a la de galaxias aisladas en una muestra de control en función de la separación proyectada de las galaxias. El panel inferior representa casos donde las masas estelares ( $M_1$  y  $M_2$ ) de las galaxias en los pares son similares (dentro de un factor dos) mientras que el panel central son pares de galaxias con diferencias de masas de hasta un factor 3 y el panel inferior son pares de galaxias con diferencias de hasta un factor 10. Las líneas de rayas indican cuando no hay exceso de formación estelar. Para cualquier rango de masas se puede observar que los incrementos mayores en SFR ocurren para separaciones proyectadas entre las galaxias menores que aproximadamente  $40 \text{ kpc } h_{70}^{-1}$  ( $40 \text{ kpc}$  equivalen a  $130\,000$  años luz). Figura adaptada del trabajo de Ellison et al. (2008). Cortesía de la *American Astronomical Society* (AAS).

Usando datos de SDSS, Ellison et al. (2008) demostraron que las tasas de formación estelar de pares de galaxias tienden a ser mayores que las de galaxias aisladas con propiedades similares. Esto se puede ver en la figura 5, donde en el eje Y se representa el exceso de formación estelar en pares de galaxias con respecto a si las galaxias no tuvieran compañeras y en el eje X la separación entre las galaxias. Las SFR de pares de galaxias con separaciones proyectadas menores que unos  $40 \text{ kpc } h_{70}^{-1}$  aproximadamente<sup>5</sup> pueden llegar a ser un 70% superiores a las SFR de galaxias aisladas. Además, existe un efecto muy claro con las masas estelares (denotadas  $M_1$  y  $M_2$  en esta figura) de las dos galaxias involucradas en la interacción. Los mayores excesos se ven cuando los pares tienen cocientes de masas próximos a la unidad y van disminuyendo a medida que las masas estelares de las galaxias se hacen más dispares, como se aprecia en la figura 5. Esto confirma de manera cuantitativa la predicción teórica de que las interacciones entre galaxias con masas similares son más eficientes en inducir la formación de generaciones nuevas de estrellas, como veremos más adelante.

En las simulaciones numéricas de interacciones entre galaxias en las que se incluyen efectos hidrodinámicos en el gas se puede modelar además de la evolución de las estrellas también el movimiento del gas hacia los centros de las galaxias (*inflows* por su denominación en inglés) y simular procesos de formación estelar intensos (ver figura 6 para un ejemplo de simulación). Además, si se incluye una receta para la SFR, se puede estudiar su evolución en el tiempo a lo largo del proceso de interacción y fusión de las galaxias así como la dependencia con las masas de las galaxias, las propiedades morfológicas de las galaxias y las trayectorias del encuentro entre las galaxias.

Las simulaciones de Mihos & Hernquist (1996) para fusiones de galaxias fueron unas de las primeras en modelar en detalle el comportamiento del gas. Eran simulaciones de fusiones mayores (normalmente referidas en inglés como *major mergers*), es decir, interacciones entre galaxias masivas y ricas en gas con masas estelares similares (o relación de masas estelares 1:1) que son apropiadas para representar galaxias clasificadas como LIRGs y ULIRGs (como las que se muestran en la figura 1). En ellas utilizaron la ley de Schmidt & Kennicutt para parametrizar la densidad de formación estelar SFRD en función de la densidad del gas  $n_{\text{gas}}$ :

$$SFRD = C n_{\text{gas}}^{1.5} \quad (7)$$

donde  $C$  es una constante.

<sup>5</sup>En esta notación  $h_{70}$  significa que las separaciones proyectadas entre las galaxias están escaladas a un valor de la constante de Hubble de  $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .

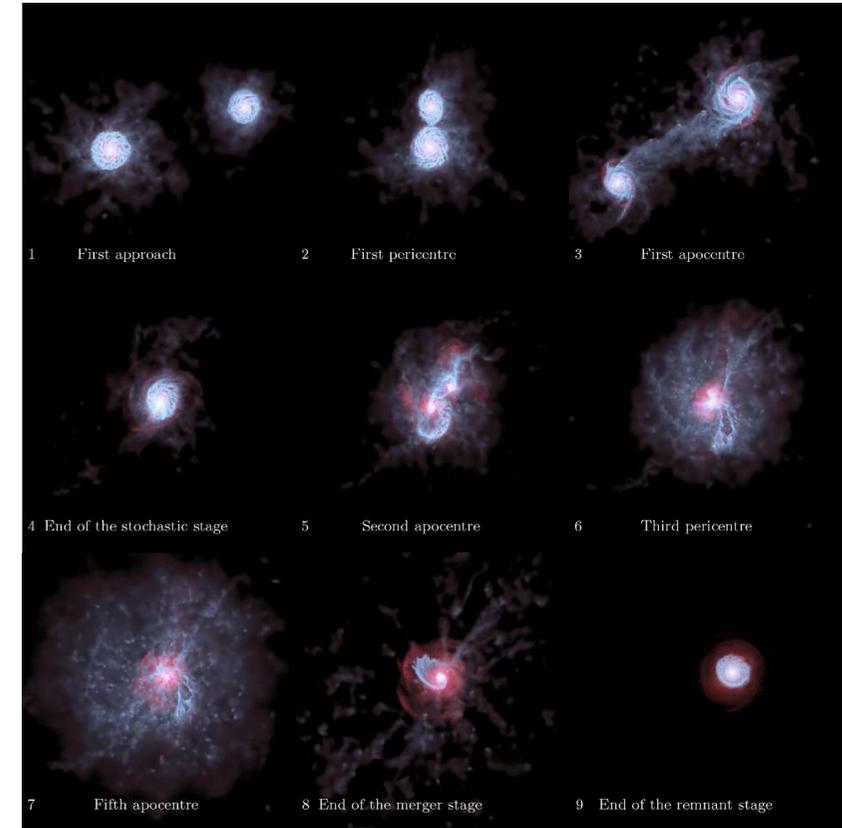


Figura 6: Instantáneas de la simulación de la interacción de dos galaxias con relaciones de masas 2:1 vistas de cara para las estrellas representadas en azul y el gas representado en rojo. Los diferentes paneles representan tiempos en unidades de gigaaños o  $10^9$  años: (1) 0,20 (primera aproximación entre las galaxias), (2) 0,32 (primer periastro, es decir, menor distancia entre las galaxias), (3) 0,55 (primer apoastro, es decir máxima separación entre las galaxias), (5) 0,85 (apocentro de la segunda pasada), (6) 0,92 (tercer periastro), (7) 0,98 (quinto apoastro), (8) 1,1 (final del proceso de fusión), (9) 2 (final del estado de remanente). Los tamaños físicos de las imágenes son  $75 \times 75 \text{ kpc}$ . Figura adaptada del trabajo de Volonteri et al. (2015).

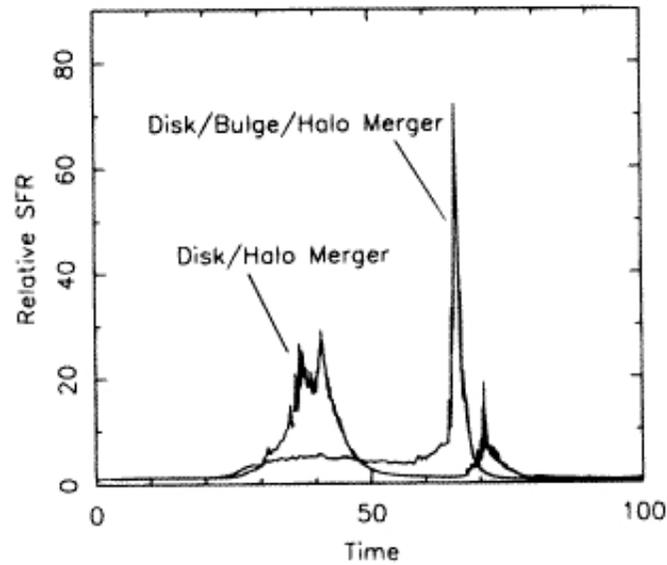


Figura 7: Resultados de las simulaciones numéricas de la interacción de dos galaxias con masas estelares similares (relación de masas 1:1) para la tasas de formación estelar relativa a galaxias aisladas en función del tiempo desde el comienzo de la interacción. Se han representado dos modelos representativos de galaxias con y sin bulbo. Figura adaptada del trabajo de Mihos & Hernquist (1996). Cortesía de la *American Astronomical Society* (AAS).

Como se puede apreciar en los resultados de estas simulaciones en la figura 7, en una interacción con galaxias con relación de masas 1:1 la tasa de formación estelar relativa a la de un disco aislado en función del tiempo desde el comienzo de la interacción tiene picos en diferentes épocas dependiendo de las propiedades estructurales de las galaxias. En ambos casos se observa que la SFR aumenta durante la interacción entre 30 y 70 veces con respecto a un disco aislado y estos picos se mantienen durante intervalos de tiempo de unos 150 millones de años. En el caso de las galaxias sin bulbo la disipación del gas y la generación del brote de formación estelar ocurren en épocas más tempranas cuando los discos de las galaxias todavía no se han fusionado completamente, mientras que en el caso de galaxias con bulbos estos procesos ocurren cuando las galaxias ya se han fusionado (Mihos & Hernquist 1996).

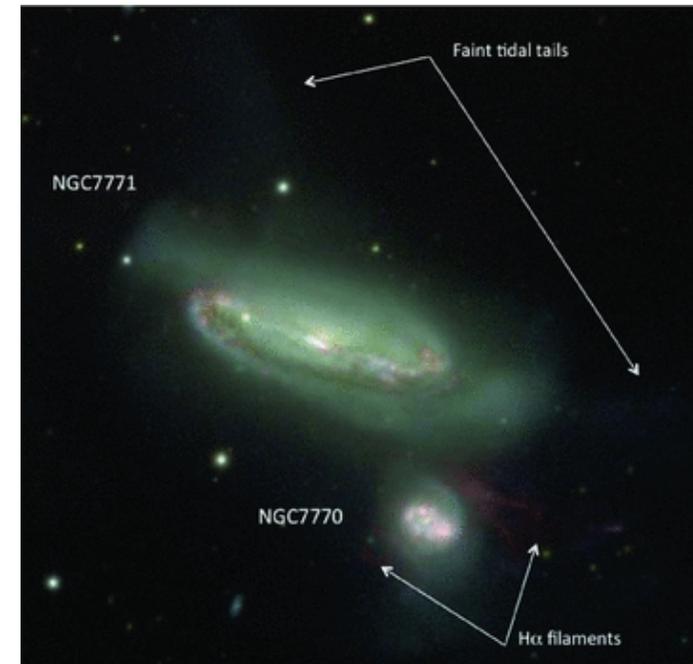


Figura 8: Imagen en colores falsos del sistema de galaxias NGC 7771 + NGC 7770, una interacción menor, tomada con tres filtros ópticos incluyendo un filtro de banda estrecha que cubre la línea de emisión  $H\alpha$  (zonas en colores rojizos) que traza gas ionizado por estrellas jóvenes y masivas y que se puede utilizar para obtener las SFR de las galaxias. Se puede apreciar que la formación estelar está ocurriendo en los brazos espirales de las galaxias y en sus centros. También se detectan filamentos de gas en las zonas externas de la galaxia satélite (NGC 7770), gas que probablemente se ha arrancado de las galaxias durante el proceso de interacción, así como colas de marea débiles en la galaxia principal (NGC 7771). Figura adaptada del trabajo de Alonso-Herrero et al. (2012).

Otros parámetros que influyen en los incrementos de las tasas de formación estelar son el tipo de órbitas del encuentro y la dirección relativa de las rotaciones de las galaxias. Además, la relación de masas estelares de las dos galaxias involucradas en el choque es otro parámetro fundamental. Cox et al. (2008) simularon en detalle fusiones menores (denominados en inglés *minor mergers*) considerando relaciones de masas estelares de hasta 1:10. En la figura 8 se muestra la imagen del sistema NGC 7771 (galaxia principal) + NGC 7770 (galaxia satélite) en el que se estima una relación entre las masas estelares de las galaxias de 10:1 (Alonso-Herrero et al.

2012). Los efectos de la interacción se aprecian con mayor facilidad en la galaxia satélite (la de menor masa) en el sistema como se puede deducir a partir de los filamentos de gas ionizado (que emite en la línea óptica  $H\alpha$ ) observados en las zonas externas de NGC 7770 así como las regiones de formación estelar en su disco. Sin embargo, el incremento de SFR total del sistema respecto al que se observaría si las galaxias estuviesen aisladas es solo de un factor dos, aunque el efecto es mucho mayor en la galaxia satélite donde se observa una elevada tasa de formación estelar específica, definida como el cociente entre la SFR y la masa en estrellas, que es mayor que el valor esperado para galaxias con masas estelares similares y sin compañeras.

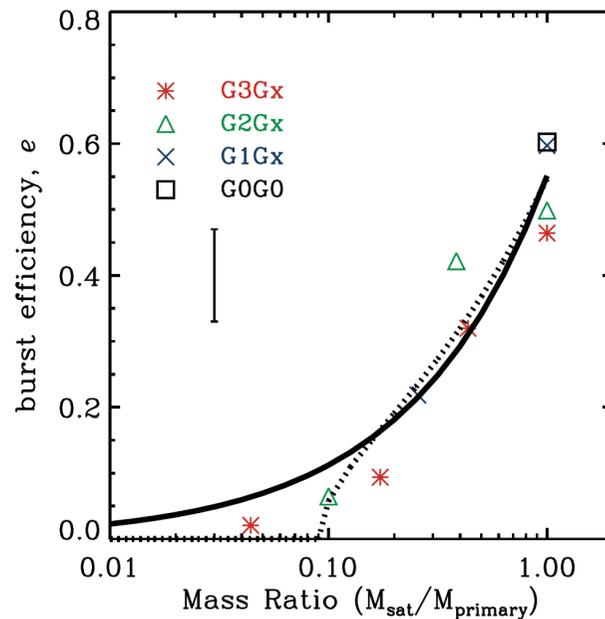


Figura 9: Eficiencia del brote de formación estelar  $e$  (ver definición en el texto) en función del cociente de masas entre la galaxia satélite ( $M_{\text{sat}}$ ) y la galaxia principal ( $M_{\text{primary}}$ ) para simulaciones de interacciones de galaxias. Los símbolos indican diferentes masas iniciales de la galaxia principal en las simulaciones: G3 para  $5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$  (asteriscos), G2 con  $1,5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$  (triángulos), G1 con  $0,5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$  (aspas) y G0 con  $0,1 \cdot 10^{10} M_{\odot}$  (cuadrados). Las curvas indican diferentes ajustes a los puntos representados y la línea vertical es el error estimado en la eficiencia del brote de formación estelar. Como se puede apreciar, cuanto mayor es la diferencia entre las masas de las galaxias principal y satélite, menor es la eficiencia en formar estrellas. Figura adaptada del trabajo de Cox et al. (2008).

En las simulaciones de Cox et al. (2008) se vio efectivamente que las fusiones menores son menos eficientes formando nuevas estrellas que las fusiones mayores y que esta relación depende fundamentalmente del cociente de masas de las galaxias que chocan. El resultado se puede ver en la figura 9 donde se ha definido la eficiencia  $e$  del brote de formación estelar como la cantidad de gas transformado en estrellas durante la interacción frente a la misma cantidad si las galaxias estuviesen aisladas. Se observa que  $e$  depende claramente del cociente de masas de las galaxias y disminuye casi un factor 6 desde interacciones 1:1 (interacción mayor) hasta interacciones menores con relaciones de masas 10:1. También se puede observar que la eficiencia del brote es prácticamente independiente de la masa inicial del progenitor más masivo.

### Formación de cúmulos estelares masivos

El telescopio espacial Hubble ha tenido un papel fundamental en el estudio de los denominados supercúmulos estelares o cúmulos estelares masivos en una gran variedad de objetos como galaxias enanas, irregulares, con brotes intensos de formación estelar, en interacción o fusiones y en LIRGs y ULIRGs. En la figura 10 se muestra una imagen del Hubble de las galaxias en interacción Las Antenas (NGC 4038 + NGC 4039 o Arp 244) donde se puede observar un gran número de estos supercúmulos estelares en la zona de solapamiento de las galaxias así como en los brazos espirales de las galaxias. Los supercúmulos estelares se caracterizan por ser jóvenes o relativamente jóvenes (edades menores que  $10^9$  años), compactos y típicamente con masas estelares de entre  $10^4$  y  $10^6 M_{\odot}$ . Uno de los mayores interrogantes sobre estos supercúmulos estelares es si podrían sobrevivir un tiempo de Hubble (es decir, un tiempo de unos 14 gigaaños, parecido a la edad del Universo) y ser los progenitores de los cúmulos globulares de poblaciones estelares viejas similares a los que se observan en la Vía Láctea.

En la sección anterior se describieron algunos resultados de trabajos que modelan numéricamente interacciones entre galaxias. Estas simulaciones están normalmente restringidas a unas cuantas configuraciones orbitales y diferentes propiedades de las galaxias que interaccionan así como resoluciones angulares de unos cientos de parsecs<sup>6</sup>. No obstante, si se quiere estudiar la formación y evolución de cúmulos estelares durante los procesos de interacción de galaxias, es necesario resolver las escalas de los tamaños físicos de las nubes donde se forman dichos cúmulos, es decir, unos 10 parsec. Por ejemplo, en el trabajo de Renaud et al. (2015) simulaban la interacción del sistema de Las Antenas (ver la figura 10)

<sup>6</sup>Parsec o pársec (símbolo pc) es una unidad de longitud equivalente a  $3,09 \cdot 10^{16}$  m y a unos 3,26 años luz. Sus múltiplos son el kiloparsec (kpc), el megaparsec (Mpc) y el gigaparsec (Gpc), equivalentes a mil, un millón y mil millones de parsecs, respectivamente.

usando una resolución física de 1,5 pc y además incluyeron efectos de formación estelar y retroalimentación de origen estelar (supernovas, presión de radiación, etc).



Figura 10: Una imagen obtenida con varios filtros ópticos con el telescopio espacial Hubble de las galaxias en interacción NGC 4038 + NGC 4039 (Arp 244) conocidas también como Las Antenas. En este sistema se observa un gran número de supercúmulos estelares jóvenes en los brazos espirales y también en la región de solapamiento entre las dos galaxias donde además hay una gran cantidad de polvo (visto en colores rojizos y bandas oscuras en esta imagen). Crédito: NASA, ESA, y el *Hubble Heritage Team* (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration y B. Whitmore (Space Telescope Science Institute).

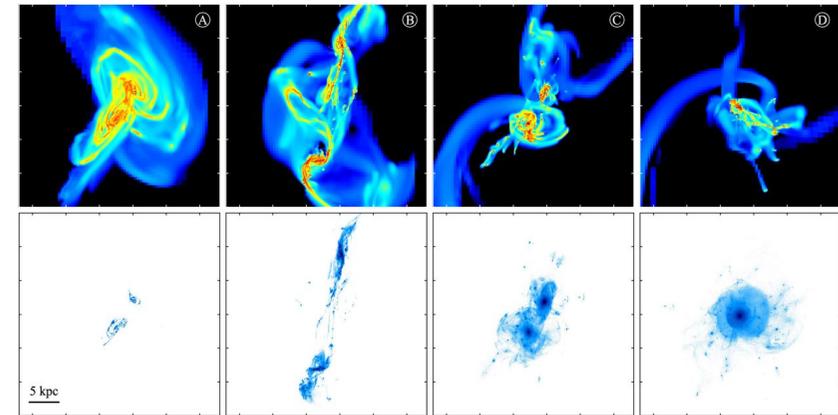


Figura 11: Simulación de la interacción de las galaxias Antenas a lo largo del tiempo. Los paneles superiores representan la densidad superficial de la componente del gas mientras que los inferiores son las estrellas formadas durante la interacción. Se muestran cuatro momentos claves en este proceso para  $t = -6 \cdot 10^6$  años,  $44 \cdot 10^6$  años,  $137 \cdot 10^6$  años y  $192 \cdot 10^6$  años, donde  $t = 0$  corresponde al primer periastro o distancia más corta entre las dos galaxias. Estos mapas revelan las zonas donde se forman los cúmulos estelares y en particular en el puente de marea que conecta las galaxias. Según esta simulación el momento en el que observamos Las Antenas en la actualidad (ver figura 10) corresponde a  $t = 152 \cdot 10^6$  años después del primer periastro. Figura adaptada de Renaud et al. (2015).

En la figura 11 se muestran algunas instantáneas de esta simulación (en el panel superior para la componente del gas y en el inferior para las estrellas formadas) en varios momentos de la interacción. El inicio ( $t = 0$  años) se ha establecido para el primer periastro, es decir, la menor distancia entre las galaxias. Las observaciones de las propiedades de formación estelar situarían a Las Antenas en  $t = 152 \cdot 10^6$  años en esta simulación. Como se puede observar en la figura, la componente gaseosa en el puente de material entre las dos galaxias se fragmenta rápidamente para formar cúmulos estelares. En la figura 12 se muestra la tasa de formación estelar frente al tiempo para la misma simulación de Las Antenas. Como se ha visto en muchos otros estudios (ver por ejemplo la figura 7), los brotes de formación estelar intensos ocurren en los momentos de los periastrós y justo antes de la fusión completa de las dos galaxias. Sin embargo, la tasa de formación de cúmulos estelares es diferente y en el caso de esta simulación la mayor parte de los cúmulos compactos en Las Antenas se han formado justo después de los primeros picos de formación estelar en el primer y segundo periastrós. Aunque, como discuten los autores de este trabajo,

todavía hay procesos físicos que no se han incluido en esta simulación, claramente se demuestra que los procesos de interacción entre galaxias son eficientes en formar cúmulos estelares.

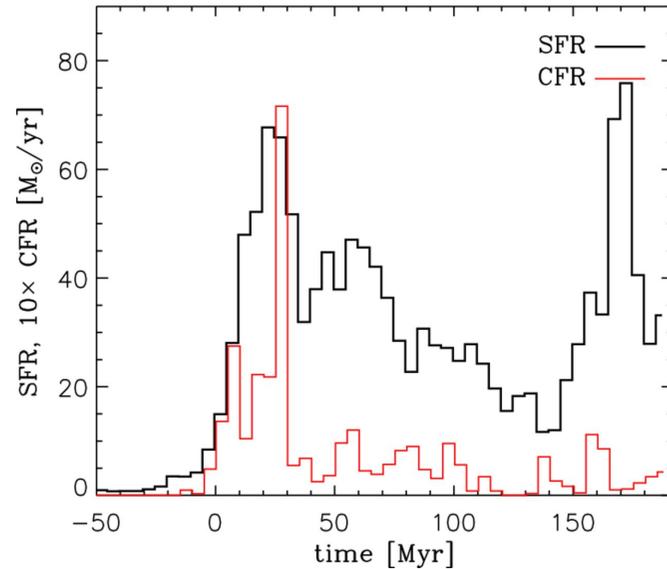


Figura 12: Resultados de las simulaciones del sistema Las Antenas (figura 11) para la tasa de formación en cúmulos estelares (CFR, por sus siglas en inglés *Cluster Formation Rate*) multiplicada  $\times 10$  comparada con la tasa de formación estelar frente al tiempo (en unidades de millones de años). Ambas tasas están cuantificadas en unidades de  $M_{\odot}$  por año. Figura adaptada de Renaud et al. (2015).

### Actividad nuclear (AGN)

En las secciones anteriores se ha mostrado que las interacciones entre galaxias son capaces de canalizar grandes cantidades de gas hacia los centros de las galaxias, comprimirlo y dar lugar a episodios de formación estelar violentos tanto en los discos y centros de las galaxias como en las colas de marea. Si el gas canalizado es además capaz de llegar a la zona de influencia del agujero negro supermasivo (a distancias menores que 1 parsec de él) entonces este gas sería acretado y daría lugar a un episodio de actividad nuclear. Entonces se detectaría como un AGN a través de, por ejemplo, líneas de emisión características, emisión en rayos X intensa e incluso elevadas luminosidades en el infrarrojo. Esto sugiere que tiene que haber una conexión entre los procesos de interacción entre galaxias, brotes de formación estelar y la presencia de actividad nuclear.

En el escenario propuesto por David Sanders y sus colaboradores, las galaxias ULIRG podrían representar una fase importante en la formación de los cuásares (ver Sanders & Mirabel 1996). Estos sistemas son mayormente interacciones/fusiones de galaxias masivas ricas en gas, tienen episodios de formación estelar en sus regiones centrales y algunas de ellas contienen AGN muy luminosos en sus centros. Si uno se fija en AGN locales menos luminosos que los cuásares, también se observa que muchos de ellos presentan en sus regiones centrales (tamaños físicos de unos pocos cientos de parsecs o menores) evidencia de episodios de formación estelar reciente con edades de unas decenas de millones de años. Cuando la relación entre estos fenómenos se estudia en escalas que incluyen toda la galaxia se encuentra que la actividad nuclear se incrementa cuando las poblaciones estelares globales son del orden de unos cientos de millones de años. Todos estos resultados por lo tanto sugieren que efectivamente la formación estelar y los fenómenos AGN están relacionados pero no son necesariamente coetáneos.

En el trabajo de Hopkins (2012) se analizó en detalle la evolución temporal de la tasa de formación estelar y la tasa de acreción de un agujero negro supermasivo (BHAR, por sus siglas en inglés *black hole accretion rate*) utilizando simulaciones numéricas de interacciones entre galaxias ricas en gas y masivas (tipo la Vía Láctea) y relaciones de masas 1:1. La BHAR (en unidades de  $M_{\odot}$  por año) y la luminosidad bolométrica del AGN  $L_{\text{bol}}$  están relacionadas con la siguiente expresión:

$$\text{BHAR} = 0,15 \frac{0,1}{E} \frac{L_{\text{bol}}}{10^{38} \text{W}} \quad (8)$$

donde  $E$  es la eficiencia de conversión de masa a energía.

En la figura 13 se presentan los resultados de una de las simulaciones de Hopkins (2012) de interacciones de galaxias en dos escalas físicas diferentes. En el panel superior se muestra la evolución con el tiempo de la tasa de formación estelar integrada para toda la galaxia y la tasa de acreción del agujero negro en épocas próximas a la fusión completa de las dos galaxias (correspondiente a  $1,1 \cdot 10^9$  años). Ambas cantidades alcanzan sus picos en este momento pero el agujero negro sigue creciendo mientras que la formación estelar se empieza a apagar porque el gas se ha consumido casi en su totalidad. Sin embargo, los agujeros negros no necesitan tanto material para ser alimentados y la galaxia se podría observar como AGN durante otros  $10^8$  años. En el panel inferior se presenta una ampliación de la misma simulación para escalas físicas menores que 20 parsecs alrededor de la época en del pico de acreción de material por el agujero negro. De nuevo se observan estos retrasos dinámicos entre la SFR y la BHAR. Por lo tanto estas simulaciones numéricas son capaces de reproducir algunas de las observaciones mencionadas anteriormente.

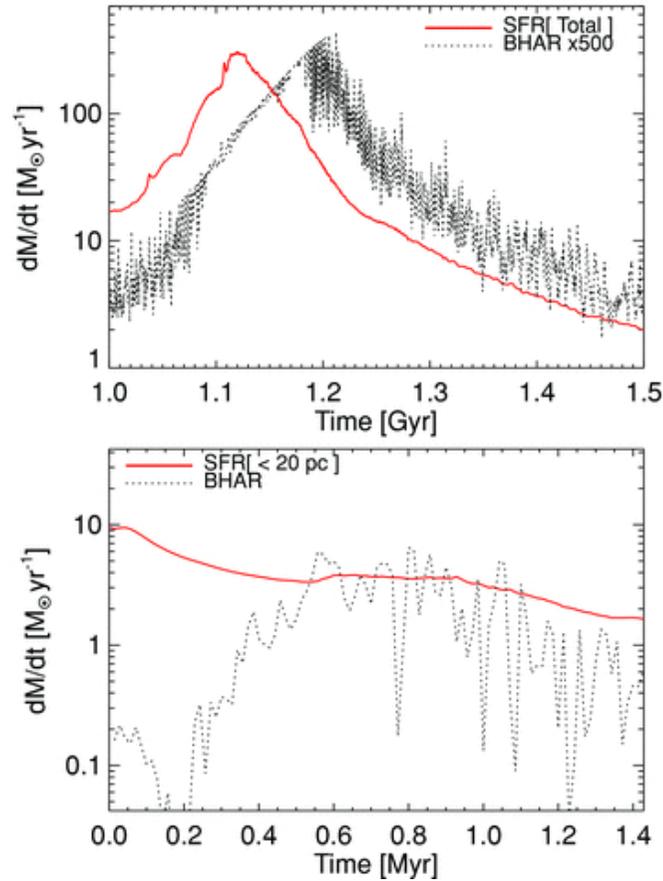


Figura 13: Evolución temporal de la tasa de formación estelar (SFR) y la tasa de acreción del agujero negro (BHAR), ambas en unidades de  $M_{\odot}$  por año, para un simulación de interacción. El panel superior es para la SFR integrada a toda la galaxia y en la época donde ocurren los máximos de SFR y BHAR. Para facilitar la comparación la BHAR está multiplicada por un factor 500. En el panel inferior se hace una reducción en el intervalo de tiempo y a escalas físicas menores que 20 pc para medir la tasa de formación estelar. Figura adaptada del trabajo de Hopkins (2012).

En general la mayoría de los trabajos observacionales que han estudiado la presencia de AGN en pares de galaxias han encontrado una correlación positiva. Ellison et al. (2011) realizó un estudio estadístico usando datos de SDSS para una muestra de pares de galaxias y otra de control de galaxias aisladas. Se vio que efectivamente hay un exceso de AGN en las

galaxias que están interaccionando. En el panel superior de la figura 14 se representa la fracción de AGN para las muestras de galaxias en pares frente a la distancia proyectada de las galaxias y se compara con la muestra de control de galaxias sin compañeras. Para identificar los AGN se utilizaron cocientes de líneas de emisión ópticas y también se incluyeron como una

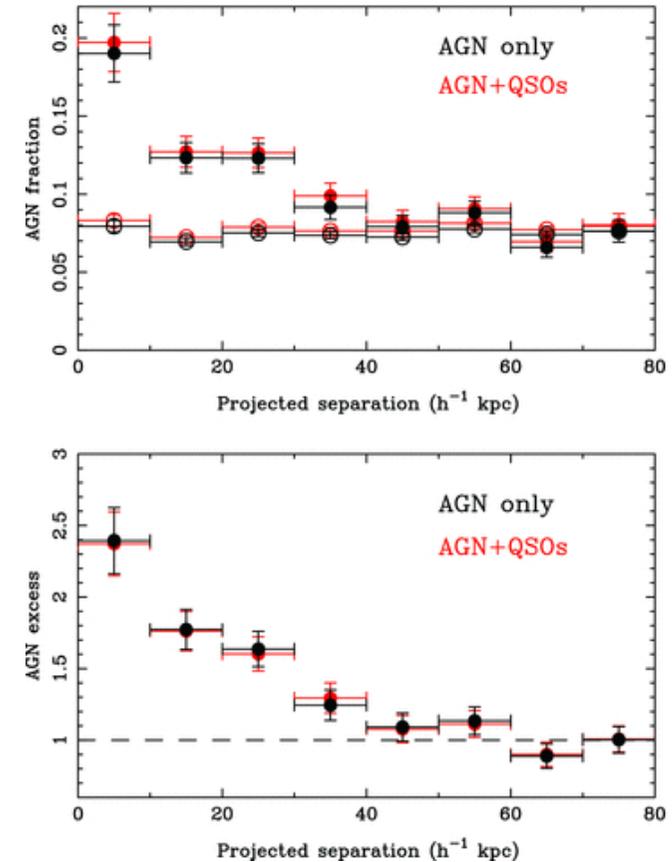


Figura 14: Presencia de AGN en pares de galaxias seleccionados en SDSS en función de la separación proyectada de las galaxias. El panel superior representa la fracción observada de AGN. Los símbolos rellenos son galaxias en pares y los símbolos sin relleno las galaxias sin compañeras en la muestra de control. Los AGN identificados por sus cocientes de líneas de emisión se representan en negro y cuando incluyen además los cuásares en rojo. El panel inferior muestra el exceso de AGN en pares de galaxias con respecto a galaxias sin compañeras. La línea de rayas indica cuando no hay exceso. Figura adaptada del trabajo de Ellison et al. (2011).

clase separada los objetos en SDSS clasificados como cuásares<sup>7</sup>. Esta comparación muestra que la fracción de pares de galaxias que contiene un AGN se incrementa a medida que disminuye la distancia proyectada entre las dos galaxias a partir de distancias menores que  $40 h_{70}^{-1}$  kpc. Por el contrario, en las galaxias sin compañeras la fracción de AGN es siempre menor que el 10%. Nótese que la muestra de galaxias de control tiene propiedades similares a los pares de galaxias con la distancia proyectada que se representa en esta figura. En el panel inferior de la figura 14 se representa el cociente de fracción de AGN en pares relativo a la muestra de control, es decir, representa el exceso de AGN. En los pares de galaxias más próximos ( $r < 10 h_{70}^{-1}$  kpc) los AGN son aproximadamente un factor 2,5 más comunes que en pares con mayores separaciones entre las galaxias, siempre comparando con galaxias aisladas.

Ellison et al. (2011) también demostraron que hay una pequeña dependencia en la fracción de AGN en pares de galaxias próximos con la relación de masas estelares en el sentido de mayores excesos en pares de galaxias con relaciones de masa 1:1 mientras que en pares de galaxias con masas estelares diferentes hay muy poco exceso de AGN con respecto a la muestra de control de galaxias sin compañeras. Si los episodios de formación estelar y la presencia de AGN están relacionados en los procesos de interacción de galaxias entonces el pequeño exceso de AGN en interacciones menores también concuerda con las predicciones de excesos similares en la SFR (figura 9).

## Formación de galaxias elípticas

Acabamos este artículo de forma muy breve con uno de los aspectos más controvertidos y todavía no resueltos sobre el origen de las galaxias elípticas y de tipos tempranos en general (como, por ejemplo, las galaxias lenticulares). Se ha postulado que son el producto final de la interacción entre dos galaxias espirales masivas, ricas en gas y con masas similares. Esta hipótesis fue planteada por primera vez por Toomre (1977) basándose en los resultados de sus simulaciones numéricas. Como se mencionó en la introducción de este artículo, este escenario para la formación de galaxias elípticas es una de las predicciones del modelo jerárquico.

Una manera de trazar la historia de fusiones previas de las galaxias de tipos tempranos del Universo Local es buscar características morfológicas en forma de capas concéntricas o conchas alrededor de las galaxias, plumas, colas de marea y corrientes estelares. Estas reliquias de colisiones pasadas se piensa que puedan sobrevivir desde unos cientos de millones de años hasta unos pocos gigaaños. Para detectarlas es necesario tomar

<sup>7</sup>Los cuásares con datos espectroscópicos en el cartografiado de SDSS se definieron de la manera clásica usando un criterio de magnitud absoluta en el óptico  $M_i < -22$  magnitudes.

imágenes superprofundas como las que se muestran en la figura 15 (y también en la figura 2 para galaxias espirales).



Figura 15: Colección de imágenes profundas tomadas en el óptico de galaxias elípticas del trabajo Atlas3D donde se puede ver que todas ellas muestran claros signos de colisiones recientes. Créditos: Canada-French-Hawaii Telescope (CFHT), CEA y P.-A. Duc.

Duc et al. (2015) en un estudio muy reciente han obtenido imágenes muy profundas de casi un centenar de galaxias de tipos tempranos en el Universo Local y han detectado estas peculiaridades de bajo brillo superficial asociadas con fusiones pasadas en una gran mayoría de ellas y que no habían sido detectadas con anterioridad, por ejemplo por el cartografiado SDSS. No obstante, aproximadamente una tercera parte de estas galaxias, incluso en estas imágenes superprofundas, siguen apareciendo con una morfología regular y son por lo tanto un reto para este escenario jerárquico de formación de galaxias muy masivas.

En conclusión, las interacciones entre galaxias son capaces de generar episodios de intensa formación estelar y actividad nuclear, así como formar cúmulos estelares masivos e incluso galaxias elípticas. No obstante, es importante hacer notar dos aspectos sobre el papel de las fusiones en la formación y evolución de galaxias. En primer lugar, no explican todas las observaciones de galaxias en el Universo Local, por ejemplo algunos tipos de galaxias elípticas. Además, en el Universo joven hay evidencia de procesos anti jerárquicos debidos a fenómenos extremos de retroalimentación. El segundo aspecto es que la interacción entre galaxias

no es el único mecanismo que da lugar a episodios de formación estelar y AGN. Otros mecanismos como los procesos seculares (por ejemplo, la presencia de una barra en la galaxia), retroalimentación positiva o la acreción de filamentos cósmicos pueden ser igual de eficientes en generar estos procesos.

## Referencias

- Alonso-Herrero, A., et al., 2013, "Uncovering the Deeply Embedded Active Galactic Nucleus Activity in the Nuclear Regions of the Interacting Galaxy Arp 299", *Astrophysical Journal*, núm. 779, págs. L14 (5 páginas).
- Alonso-Herrero, A., et al., 2012, "The NGC 7771+NGC 7770 minor merger: harassing the little one?", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, núm. 425, págs. L45-L50.
- Arp H., 1966, "Atlas of Peculiar Galaxies", *Astrophysical Journal Supplement Series*, núm. 14, págs. 1-77.
- Cox, T. J., et al., 2008, "The effect of galaxy mass ratio on merger-driven starbursts", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, núm. 384, págs. 386-409.
- Curtis, S., 1999, "Galaxy Collisions", *Physics Reports*, núm. 321, págs. 1-137.
- Duc, P.-A., et al., 2015, "The ATLAS3D project – XXIX. The new look of early-type galaxies and surrounding fields disclosed by extremely deep optical images", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, núm. 446, págs., 120-143.
- Ellison, S., et al. 2008, "Galaxy Pairs in the Sloan Digital Sky Survey. I. Star Formation, Active Galactic Nucleus Fraction, and the Mass-Metallicity Relation", *Astronomical Journal*, núm. 135, págs. 1877-1899.
- Ellison, S., et al. 2011, "Galaxy pairs in the Sloan Digital Sky Survey - IV. Interactions trigger active galactic nuclei", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, núm. 418, págs. 2043-2053.
- García Burillo, S., 2016, "¿Cuál es del destino de la Vía Láctea?", *Anuario del Real Observatorio*, núm. 1, págs. 419-435.
- Herschel, W., 1811, "Astronomical Observations Relating to the Construction of the Heavens, Arranged for the Purpose of a Critical Examination, the Result of Which Appears to Throw Some New Light

- upon the Organization of the Celestial Bodies", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, núm. 101, págs. 269-336.
- Hopkins, P. F., 2012, "Dynamical delays between starburst and AGN activity in galaxy nuclei", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, núm. 420, págs. L8-L12.
- Hubble, E. P., 1926, "Extragalactic Nebulae", *Astrophysical Journal*, núm. 64, págs. 321-369.
- Larson, R. B. & Tinsley B. M., 1978, "Star Formation Rates in normal and peculiar galaxies", *Astrophysical Journal*, núm. 219, págs. 46-59.
- Martínez-Delgado, D., et al., 2010, "Stellar tidal streams in spiral galaxies of the local volume: A pilot study with modest aperture telescopes", *Astronomical Journal*, núm. 140, págs. 962-967.
- Mihos, J. C., & Hernquist, L., 1996, "Gasdynamics and starbursts in major mergers", *Astrophysical Journal*, núm. 464, págs. 641-663.
- Renaud, F., et al., 2015, "A parsec-resolution simulation of the Antennae galaxies: formation of star clusters during the merger", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, núm. 446, págs. 2038-2054.
- Rosse, Earl of, 1850, "Observations of the Nebulae", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, núm. 140, págs. 499-514.
- Sanders, D. & Mirabel, F. I., 1996, "Luminous Infrared Galaxies", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, núm. 34, págs. 749-792.
- Schmidt, M., 1963, "3C273: A star-like object with large red-shift", *Nature*, núm. 197, págs. 1040.
- Toomre, A., & Toomre, J., 1972, "Galactic Bridges and Tails", *Astrophysical Journal*, núm. 178, págs. 623-666.
- Toomre, A., 1977, "Mergers and Some Consequences", en *Evolution of Galaxies and Stellar Populations*, Proceedings of a Conference at Yale University, May 19-21, 1977. Edited by Beatrice M. Tinsley and Richard B. Larson. New Haven: Yale University Observatory, págs. 401-426.
- Volonteri, M., et al., 2015, "Growing black holes and galaxies: black hole accretion versus star formation rate", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, núm. 449, págs. 1470-1485.

- Vorontsov-Velyaminov, B.A., 1959, "Atlas and Catalogue of interacting galaxies, Part 1." Moscow University, Moscow: SAI. OCLC 657642954.
- Vorontsov-Velyaminov B.A., 1977, "Atlas of interacting galaxies, part II and the concept of fragmentation of galaxies", *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, núm. 28, págs. 1-116.
- Zwicky, F. 1961, "Catalogue of Galaxies and Clusters of Galaxies", California Institute of Technology, Pasadena.