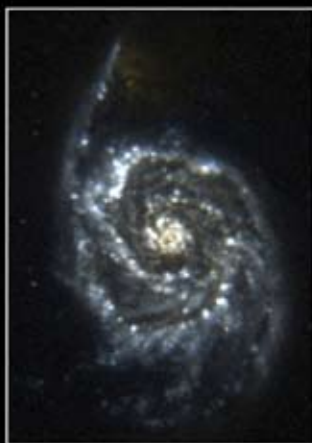


LAS GALAXIAS DEL

ÁNGEL R. LÓPEZ SÁNCHEZ



Rayos-X



UV



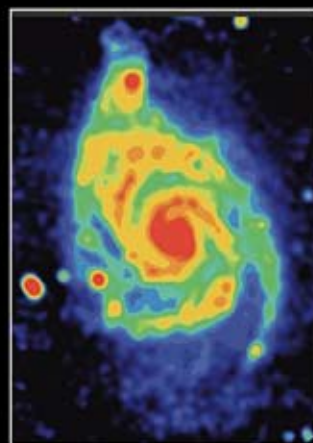
Óptico



NIR



FIR



Radiocontinuo



Ángel Rafael López Sánchez (Angel.Lopez-Sanchez@csiro.au) es astrónomo aficionado desde muy joven, y pertenece a la Agrupación Astronómica de Córdoba. Es licenciado en Física Teórica por la Universidad de Granada y doctor en Astrofísica por la Universidad de la Laguna. Fue astrofísico residente del Instituto de Astrofísica de Canarias entre 2001 y 2005. Actualmente, disfruta de una posición postdoctoral en CSIRO/Australia Telescope National Facility (Sydney, Australia) donde realiza observaciones multifrecuencia de grupos de galaxias. Participa en numerosas actividades de divulgación, destacando su blog astronómico El Lobo Rayado (<http://angel-rls.blogalia.com>)

Desde los pioneros trabajos de Hubble sabemos que las galaxias se clasifican en pocas categorías (en esencia, en espirales, elípticas e irregulares), pero pueden diferir mucho entre sí cuando se observan con detalle. Los esfuerzos de los últimos años no sólo se han centrado en el análisis de las galaxias en el rango óptico (los colores que nosotros vemos) sino que se han ampliado a todas las frecuencias, desde los rayos X a las ondas de radio, en especial de las galaxias más cercanas. En este artículo se describen los logros más sobresalientes encontrados cuando se combinan observaciones en todas las frecuencias, detallando los cartografiados y proyectos que actualmente se están desarrollando para comprender mejor la estructura, naturaleza y evolución de las galaxias.

UNIVERSO LOCAL

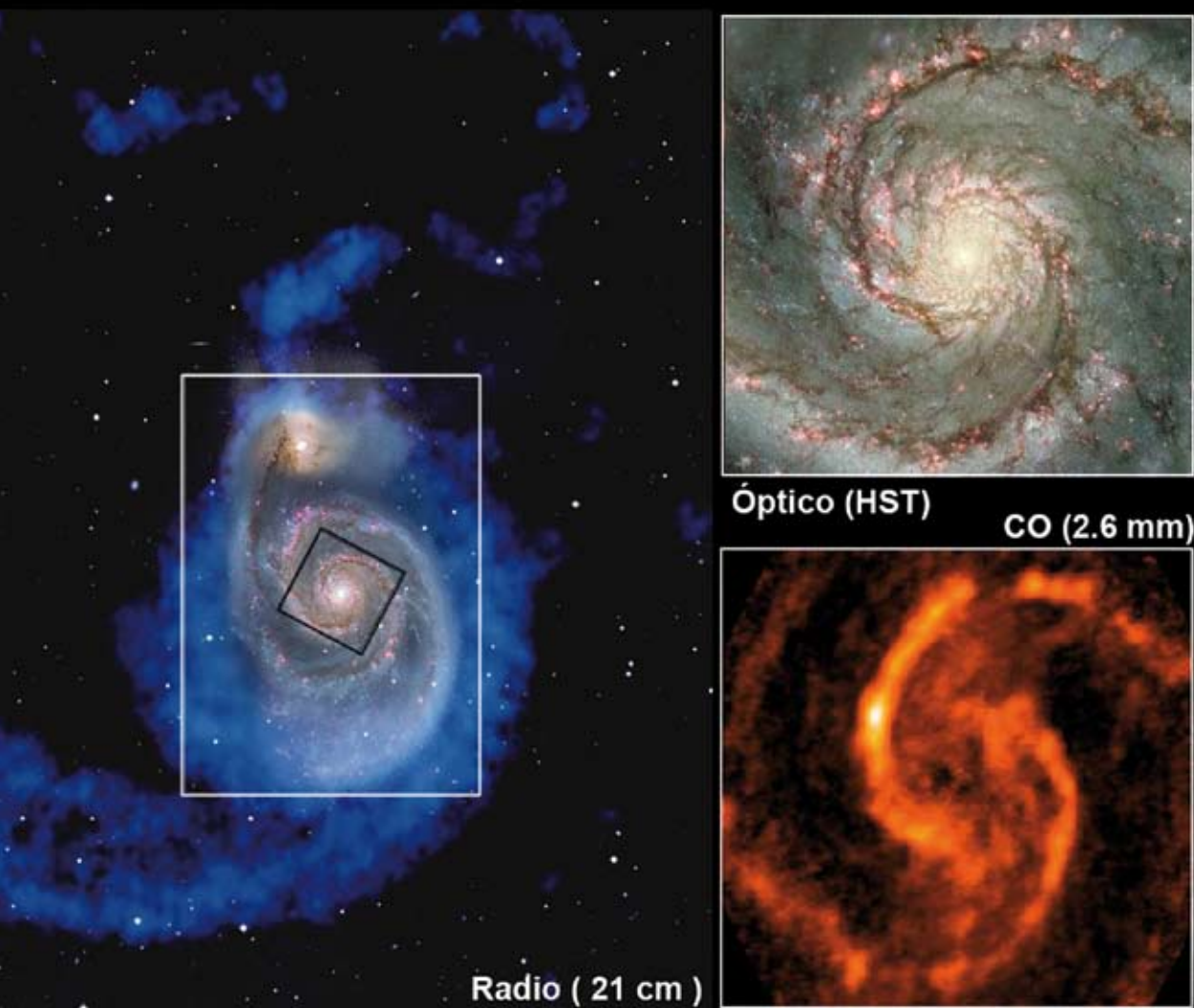


Figura 1. La galaxia espiral M 51 en todas las longitudes de onda. A la izquierda, en rayos X (Chandra), UV (GALEX), óptico (SDSS), NIR (2MASS), FIR (Spitzer) y radio continuo (VLA). La imagen central muestra la distribución de gas atómico (H I) cuando se observa en 21 cm; se ha superpuesto la imagen óptica del SDSS para mejor visualización. El recuadro blanco muestra el tamaño de las seis imágenes de la izquierda. El recuadro negro indica la zona central, representada a la derecha tanto con HST como en frecuencias milimétricas (CO a 2,6 mm, OVRO).

El universo de las estrellas desborda la mente humana. Inspira, conmociona, motiva, estremece, hace reflexionar. Nos mueve lejos del universo de lo cotidiano, transportándonos a mundos exóticos distantes en el tiempo y en el espacio, a difusas nubes multicolores de gases en movimiento donde nuevas estrellas dan luz, o a enjambres de soles que, dominados por la fuerza de la gravedad, distorsionan su estructura espiral desarrollando largas colas de marea. ¿Cuánto hemos avanzado en el conocimiento del Universo en el último siglo? Al principio del siglo XX los astrónomos aún no sabían si las *nebulosas espirales* que se observaban con los nuevos telescopios eran

sistemas planetarios en formación pertenecientes a la Vía Láctea (hipótesis sostenida por el astrónomo Harlow Shapley) o si en realidad eran otros *universos-isla* distintos a la *Galaxia* (tal y como afirmaba su *colega* Herber Curtis). Tras los descubrimientos de estrellas variables cefeidas en NGC 6822 y M 31 por Edwin Hubble el Universo *se agrandó*: existen otros objetos lejanos independientes de la Vía Láctea, existen otras *galaxias*. Curtis tenía razón en este punto. Sin embargo, y así es el juego de la Ciencia, las medidas de Shapley sobre la posición del Sol respecto al centro de la Vía Láctea y el propio tamaño de ésta eran más acertados.

Los astrónomos de hoy día debemos mucho a Hubble y a su paciencia. Por muy romántico que uno pueda ser con la Astronomía, no me veo todas las noches pasando frío y hambre subido en el foco del uno de los mayores telescopios del mundo tomando placas fotográficas de galaxias lejanas. En 1936, Hubble publicó el libro *El reino de las Nebulosas* donde adaptaba un primer esquema sobre la clasificación de las galaxias en espirales, elípticas e irregulares. Esta primera idea se fue modificando poco a poco porque las placas fotográficas que Hubble iba coleccionando revelaban galaxias con nuevas morfologías. Fue su estudiante, Allan Sandage, quien en 1961 proporcionó la versión definitiva en su libro *El Atlas Hubble de Galaxias*, el famoso *diagrama de diapasón*, donde se representaban las galaxias elípticas a la izquierda y las espirales a la derecha.

irregulares, ricas en gas hidrógeno, muestran colores más azules, lo que indica la existencia de estrellas jóvenes y formación estelar, como revelan los espectros con líneas de emisión. Las estrellas jóvenes coexisten con otras más evolucionadas que se crearon mucho tiempo atrás y aún no han desaparecido. En las galaxias de tipo espiral (Figura 2, izquierda), la formación estelar se concentra básicamente en un disco en rotación rico en gas y en polvo interestelar, donde se crean los brazos espirales. La actividad de formación estelar es constante a lo largo de todo el sistema, aunque la zona central (el *bulbo*) suele estar dominada por poblaciones de estrellas más viejas. En las galaxias irregulares el nacimiento de las estrellas está localizado más o menos de manera no homogénea en zonas concretas de gran actividad, lugares donde se crean gran cantidad de estrellas en

Figura 2. (Izquierda) Imagen de la galaxia espiral NGC 4414, localizada a 60 millones de años, usando filtros ópticos (WFPC2 en el HST). Se aprecian muy bien las estructuras típicas de una galaxia espiral. (Derecha) Imagen de la galaxia elíptica gigante M 87, combinando datos en óptico e infrarrojo cercano (WFPC en el HST). Las estrellas se encuentran muy agrupadas hacia su centro, donde se localiza un agujero negro que podría tener una masa de 2.600 millones de soles. Se aprecia claramente el chorro de gas que surge de su centro. Muchos de los objetos que la rodean, aparentemente estelares, son cúmulos globulares, cada uno de ellos posee cerca de un millón de estrellas.

La clasificación óptica de las galaxias

Tras Hubble y Sandage, ya en los últimos treinta años del siglo pasado, se fueron descubriendo galaxias cada vez más lejanas y peculiares, consecuencia de la mejora de las observaciones astronómicas por los avances técnicos (entre ellos, la llegada de la cámara CCD o el uso de sistemas de *óptica adaptativa*) y por los nuevos grandes telescopios repartidos por todo el globo: 3,5 m CAHA (España), 3,9 m AAT (Australia), 4,2 m WHT (España), 6 m BTA (Rusia), 8,1 m GEMINI (Chile y EE.UU.), 8,2 m VLT (Chile) y 10 m Keck (EE.UU.) como representativos en sus clases. El refinamiento de las observaciones permitió revisiones en la clasificación de las galaxias y análisis estadísticos entre las diversas clases morfológicas.

Una de las formas más útiles de caracterizar una galaxia es mediante el ritmo con el que se forman nuevas estrellas y la relación entre estrellas jóvenes y viejas. Así, las galaxias con un color más *rojizo* suelen ser las elípticas (Figura 2, derecha), que poseen las poblaciones de estrellas más evolucionadas, carecen de gas hidrógeno y apenas muestran líneas de emisión, indicando que la formación estelar está prácticamente parada. Por el contrario, las galaxias espirales y las

poco tiempo. A veces, una galaxia irregular concentra tan intensa formación estelar que parecen *nebulosas gigantes*; a estos objetos se les conoce como galaxias *starbursts* (no tiene traducción en español, podríamos adaptar el término como galaxias *estallantes*, Figura 3 derecha).

Gracias al Telescopio Espacial Hubble (HST, *Hubble Space Telescope*) hemos mejorado sustancialmente nuestro conocimiento en el campo de la astronomía extragaláctica. Este telescopio, que consta de un espejo de 2,4 m, se bautizó en honor al insigne astrofísico porque uno de sus principales objetivos era precisar el valor de la constante que relaciona la velocidad a la que parece que se alejan las galaxias con su distancia (*la constante de Hubble*), relación que tiene su origen en la propia expansión del Universo. Aparte de las impresionantes imágenes de galaxias y su entorno que HST ha proporcionado, los logros en este campo han sido la confirmación de la existencia de gigantescos agujeros negros en los centros de las galaxias, la detección de las galaxias huéspedes de los *cuásares* (objetos muy energéticos de aspecto casi puntual situados a grandes distancias, probablemente núcleos activos de galaxias jóvenes), la resolución de



galaxias cercanas en estrellas individuales, el estudio de galaxias en colisión o el descubrimiento de nuevas lentes gravitatorias. Uno de sus últimos programas científicos se denomina *ACS Nearby Galaxy Survey Treasure* (ANGST), cuyo principal objetivo es realizar observaciones profundas de una muestra de galaxias del universo local para efectuar un análisis detallado de sus morfologías, poblaciones estelares e historias de formación estelar.

Hoy día seguimos descubriendo más y más galaxias y cada vez más y más lejos en el tiempo y en el espacio. Esto se ha conseguido no sólo usando telescopios espaciales o de la clase 8-10 metros sino a través de cartografiados obtenidos de forma sistemática con telescopios más modestos. El más importante hasta la fecha es SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*), que ha captado la luz de más de un cuarto de todo el cielo en filtros ópticos (entre 3.000 y 10.000 Å) completando con datos espectroscópicos. SDSS usa un telescopio de 2,5 m (Observatorio Apache Point, Nuevo México, EE.UU.) y proporciona un mapa tridimensional de un millón de galaxias¹. Otro cartografiado es 6dFGS (*6dF Galaxy Survey*) que, usando el telescopio 1,2 m UK Schmidt del observatorio de Siding Spring (Australia) y el instrumento multifibra 6dF (*Six Degrees Field*), está observando unas 120.000 galaxias del hemisferio Sur, completando la región que no ve SDSS. También muy importante ha sido el cartografiado 2MASS (*Two Micron All-Sky Survey*) en infrarrojo cercano (NIR 12.000–22.000 Å), que ha usado dos telescopios similares de 1,3 m en ambos hemisferios (Observatorios de Monte Hopkins, EE.UU. y Cerro Tololo, Chile) para mapear todo el firmamento. La observación en NIR tiene la ventaja de que la luz no se extingue tanto como en el rango óptico, accediendo a zonas oscurecidas por el polvo interestelar como las regiones más densas de las nebulosas o el propio centro Galáctico. 2MASS ha detectando millón y medio de galaxias, más de la mitad catalogadas por primera vez. La representación de todas en un mapa conjunto revela la distribución de galaxias en el Universo cercano.

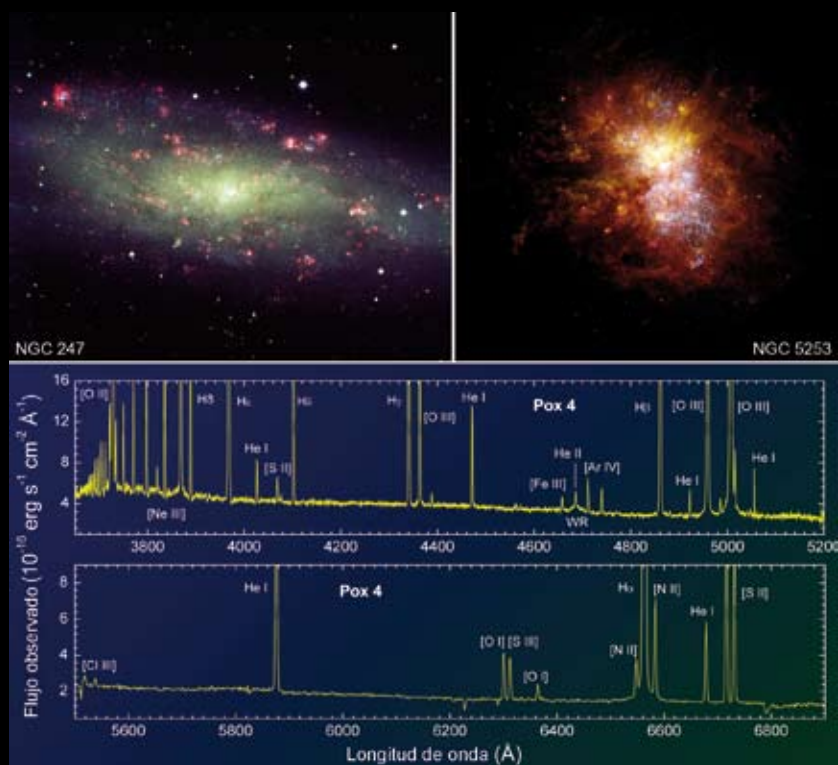
El Volumen Local

Sin embargo los astrofísicos deben centrarse en el análisis detallado de las características de las galaxias más cercanas para poder extrapolar propiedades de objetos más lejanos. Ésta es la razón por la que en los últimos años se han iniciado ambiciosos proyectos para conocer con detalle la estructura, la formación estelar y la evolución de las galaxias cercanas, en particular de la región conocida como el *Volumen Local* (VL), una esfera de radio de 10 Mpc (32,6 millones de años luz) centrada en nuestro Grupo Local. Con las técnicas actuales se pueden obtener medidas precisas e independientes de la distancia a las galaxias que lo habitan, fijando sus propiedades básicas como luminosidad, contenido estelar, de gas y de polvo, ritmo de formación estelar o masa. El primer catálogo de galaxias del VL fue compilado

en 1979 por Kraan-Korteweg y Tammann, comprendiendo 179 galaxias. El eminente astrónomo ruso Igor Karachetsev elevó el número hasta 226 en 1994. La actual versión de galaxias censadas en el VL es de 550 objetos, la mayoría localizados en los grupos del Escultor, Centauro y M 81.

El análisis del VL no se ha centrado únicamente en el estudio de las propiedades *ópticas* (esto es, de los colores que *nosotros* vemos) de las galaxias, sino que se ha abierto a todo el espectro electromagnético, desde los rayos X a las ondas de radio. Cada parcela espectral permite ampliar el conocimiento de un aspecto concreto de las galaxias: mientras que en los colores del óptico e infrarrojo cercano identificamos la componente estelar, cuando observamos en ultravioleta destacan las regiones activas de formación estelar y las poblaciones más jóvenes de estrellas;

Figura 3. (Izquierda) Galaxia NGC 247 en los filtros B (azul), R (verde) y H α (rojo), resaltando este último la posición de las regiones de formación estelar (WFC en el 2,5 m INT). (Derecha) Imagen de la galaxia enana starburst



si miramos en infrarrojo analizamos el polvo que convive entre las estrellas y el gas, mientras que si observamos en ondas de radio podemos contabilizar la cantidad de gas hidrógeno o gas molecular disponible para formar nuevos soles. En rayos X y en continuo de radio vemos las regiones más energéticas de las galaxias. Sólo un análisis combinando todos los datos *multifrecuencia* permiten entender qué ocurre dentro de las galaxias, cómo evolucionan y cómo se relacionan con su entorno.

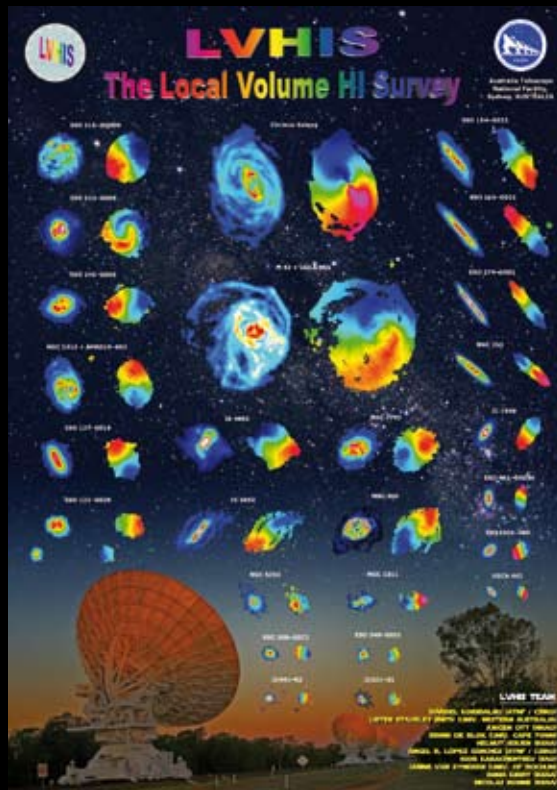
Las líneas de emisión en el espectro óptico: el gas ionizado

Antes de pasar a *colores* más exóticos debemos recordar que dentro del rango óptico tenemos más información. En varias ocasiones se ha citado al gas

NGC 5253 combinando imágenes del HST en filtros UV (azul), H α (verde) y [S II] (rojo). (Abajo) Espectro óptico típico de una galaxia starburst (POX 4) mostrando gran cantidad de líneas de emisión del gas ionizado (ISIS en el 4,2 m WHT). Imágenes cedidas por el autor.

ionizado como un componente de las galaxias y una característica importante para su clasificación. El gas ionizado (localizado en las nebulosas o *regiones H II*) nos indica dónde está sucediendo la formación estelar: algunos de los soles recién nacidos son tan masivos y luminosos que emiten grandes cantidades de radiación ultravioleta, *encendiendo* el gas. Como consecuencia de los fenómenos físicos que acontecen en el interior de las nubes de gas ionizadas, los fotones liberados muestran características muy concretas que dependen de la cantidad de gas ionizado y de la composición química de la nube: el espectro observado (descomposición de la luz en frecuencia) es rico en líneas de emisión. En la Figura 3 se muestra como ejemplo el espectro óptico de la galaxia POX 4.

Figura 4. Distribución (izquierda) y cinemática (derecha) del gas atómico (H I) para 26 galaxias del cartografiado LVHIS (Local Volume H I Galaxies) usando datos obtenidos con el interferómetro ATCA (Australia). Destaca la impresionante distribución de gas atómico en la galaxia M 83 (segundo objeto en columna central). Póster presentado en la conferencia internacional «Galaxies in the Local Volume» celebrada en Sydney en julio de 2007.



La línea de emisión más brillante es la línea alfa del hidrógeno, $H\alpha$, situada a 6.563 \AA (la zona roja de nuestro arco iris). Usando un tipo de filtros para seleccionar sólo esta emisión nebulosa se pueden localizar las regiones activas donde están naciendo las estrellas, estimar el ritmo de formación estelar y trazar los brazos espirales de las galaxias. También se pueden descubrir estructuras difusas, como oquedades y filamentos, consecuencia de explosiones de supernova y vientos de estrellas masivas (NGC 5253, Figura 3) o la existencia de *vientos galácticos* en galaxias con mucha formación estelar (M 82, Figura 8).

Además de líneas de hidrógeno, el gas ionizado presenta líneas de emisión de otros elementos químicos como helio, oxígeno, nitrógeno, azufre, argón, cloro, hierro,... Gracias a este *código de barras*, y a pesar de la gran distancia que nos separa, podemos

conocer con relativo detalle la composición química del gas (*metalicidad*) y otras propiedades físicas como su densidad, su temperatura, cuánto se extingue la luz o cómo se mueve el gas. Las galaxias espirales muestran un gradiente de abundancias: las regiones más céntricas son más ricas químicamente (están más evolucionadas) que las regiones más externas. Además, se detectan muchas galaxias enanas e irregulares con metalicidades muy bajas (abundancias químicas alrededor del 1 % de la solar), lo que indica que o son muy jóvenes o la formación estelar ha estado *parada* durante miles de millones de años. La cinemática determinada a partir de la variación de la posición de las líneas de emisión ha permitido conocer la rotación de las galaxias, detectar agujeros negros supermasivos y localizar corrientes de marea desencadenadas por la interacción y fusión de dos sistemas independientes.

Otros análisis de galaxias se realizan estudiando las *líneas de absorción* que se forman en las estrellas de clase intermedia y tardía, con las que también se estima la metalicidad y la edad de la formación estelar. Sin embargo, el análisis del gas ionizado tiene la gran ventaja de su alta luminosidad y alto brillo superficial que, junto al espectro de líneas de emisión, permite su observación en objetos muy lejanos.

El rango ultravioleta: las estrellas masivas

A la hora de estudiar los fenómenos de la formación estelar y las estrellas masivas, es fundamental irse a longitudes de onda del ultravioleta (UV, $1.000\text{--}3.000 \text{ \AA}$), pero éstas sólo son accesibles desde el espacio. Las estrellas O y B de tipo temprano, las más calientes (temperaturas superficiales entre 20.000 y 50.000 K) y masivas, emiten gran parte de su luz en estas frecuencias, (ver NGC 5253 en Figura 3). Las observaciones en el rango UV trazan muy bien la población de estrellas jóvenes de las galaxias y no sólo las regiones de formación estelar más activas que traza la emisión en $H\alpha$.

Aunque el HST observa en UV, otros satélites dedicados en exclusiva a este rango espectral han sido el *International Ultraviolet Explorer* (IUE) o el *Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer* (FUSE), aunque estaban dedicados más a objetos galácticos. Desde 2003, el satélite GALEX (*Galaxy Evolution Explorer*), de medio metro de tamaño, realiza un cartografiado en UV de todo tipo de galaxias cercanas, el denominado *GALEX Atlas of Nearby Galaxies*. Uno de sus primeros resultados es el hallazgo de regiones de formación estelar en zonas externas de galaxias cercanas (como en M 83) donde apenas existe emisión en $H\alpha$; posiblemente son consecuencia de perturbaciones gravitatorias.

El infrarrojo lejano: el polvo interestelar

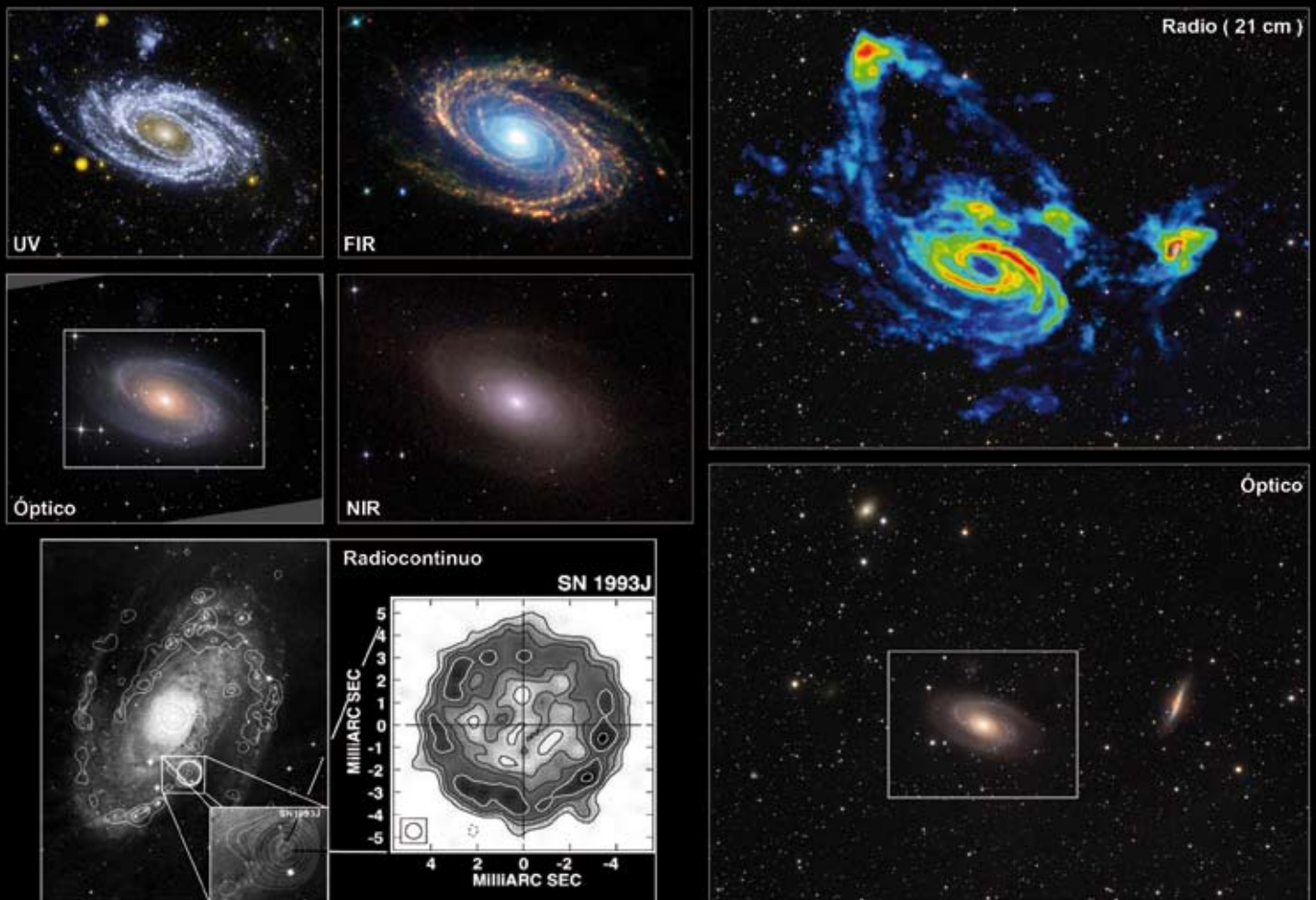
Otro rango espectral inaccesible desde la superficie terrestre es el infrarrojo lejano (FIR, de 20 a

350 micras). Mientras que en el infrarrojo cercano observamos las estrellas más frías y viejas, las gigantes rojas y enanas marrones (objetos con temperaturas entre 3.500 y 700 K), en FIR nos movemos en el rango de temperaturas entre 20 y 140 K (250–130 grados bajo cero en la escala Celsius), permitiendo el estudio de la radiación térmica del polvo frío. En FIR penetramos en las regiones más densas de gas y polvo, completamente opacas en el óptico, obteniendo una visión única de las regiones de formación estelar, desde sistemas planetarios en formación a discos de galaxias espirales y centros galácticos.

hallan ocultas por el polvo. Estos objetos muestran una formación estelar muy elevada y claros indicios de interacciones, como *Las Antenas* (Figura 7) o Arp 220.

Desde 2003 está disponible el telescopio espacial Spitzer que consta de un espejo de 85 cm enfriado casi al cero absoluto. Realiza tanto imágenes como espectroscopia en FIR, siendo capaz de detectar moléculas orgánicas que sólo emiten en estas frecuencias. Las imágenes astronómicas más sorprendentes de los últimos años se han realizado con Spitzer, como su visión de M 51 (Figura 1). El

Figura 5. La galaxia espiral M 81 en múltiples frecuencias: UV (GALEX), óptico (R. Gendler), NIR (2MASS), FIR (Spitzer) y radio continuo (3,6 cm VLA), incluyendo el detalle de SN 1993J obtenido con VLBI. A la derecha, imagen del grupo de galaxias de M 81 y M 82 en óptico y en 21 cm HI radio (VLA), des-



Muchos descubrimientos en FIR se consiguieron a finales del siglo pasado con datos de los satélites IRAS (*InfraRed Astronomical Satellite*) e ISO (*Infrared Space Observatory*). De especial relevancia fueron las observaciones de IRAS, lanzado en 1983 y que cartografió el 93 % del cielo en FIR, detectando alrededor de 350.000 nuevas fuentes astronómicas. Sus datos mostraron una clara relación entre la emisión en infrarrojo y el ritmo de formación estelar que una galaxia experimenta. Además, IRAS detectó un tipo de galaxias muy luminosas en FIR, denominadas LIRG (*Luminous infrared galaxies*), cuyas poblaciones estelares se

proyecto SINGS (*Spitzer Infrared Nearby Galaxy Survey*), liderado por los astrofísicos Robert Kennicutt, Jr. y Daniela Calzetti, desarrolla un análisis de 75 galaxias cercanas para caracterizar la emisión en FIR a lo largo de la secuencia de Hubble, concretando la distribución de estrellas viejas (a 3,6 micras) y las regiones de formación estelar y polvo (a 24 micras). Los objetivos del proyecto SINGS van más allá del estudio en FIR, sino que propone combinar esos resultados con datos de GALEX (UV), óptico, infrarrojo cercano y radio para obtener un Atlas espectral UV-radio en bandas anchas de galaxias cercanas.

velando la complejidad de la nube de gas atómico que envuelve al sistema, con varios puentes entre las galaxias. El recuadro en la imagen óptica de M 81 y M 82 tiene el mismo tamaño que las figuras de M 81 en UV y óptico. El recuadro en la imagen óptica de M 81 tiene el mismo tamaño que las figuras en NIR, FIR y radio continuo.

Las ondas de radio a 21 cm: el gas atómico

Mucho de nuestro conocimiento actual de las galaxias se ha conseguido a través de estudios del gas atómico en la línea de 21 cm del hidrógeno neutro. Estos análisis son fundamentales para conocer los procesos que dirigen la formación estelar, la dinámica y estructura del medio interestelar y la distribución de materia (ordinaria y oscura) en las galaxias, incluida la Vía Láctea. El hidrógeno atómico es generalmente muy abundante en las galaxias y no sufre de la extinción por el polvo. Aunque las primeras observaciones en HI se realizaron con radiotelescopios de una única antena², en los últimos treinta años se han construido varios complejos que combinan la luz de varias antenas: los *radio-interferómetros*. Los más conocidos son VLA (*Very Large Array*, EE.UU.), ATCA (*Australia Telescope Compact Array*, Australia) y WSRT (*Westerbork Synthesis Radio Telescope*, Holanda). Los

Figura 6. (Izquierda) Galaxia elíptica M 87, a 17 Mpc (50 millones de años luz), observada por VLA a diferentes frecuencias del continuo de radio y diferentes escalas espaciales: desde 90 cm mostrando la estructura a gran escala, hasta 2 cm (con VLBA, interferometría de muy larga base) desvelando la zona más interna del chorro de gas que sale del agujero negro central

masivo del centro de la galaxia, muy colimado por los campos magnéticos del disco caliente que rodea el agujero negro. La emisión en rojo en la imagen a 90 cm corresponde a la zona más brillante (imagen a 20 cm) y coincide con el máximo de luz en óptico. También se ha incluido la imagen del HST para comparación (Imagen cortesía de NRAO/AUI). (Derecha) Galaxia Centauro A observada por la antena de Parkes (Australia) a 1,4 GHz y cubriendo un tamaño de 9° x 5° y por VLA (Imagen cortesía Ilana Feain, ATNF).

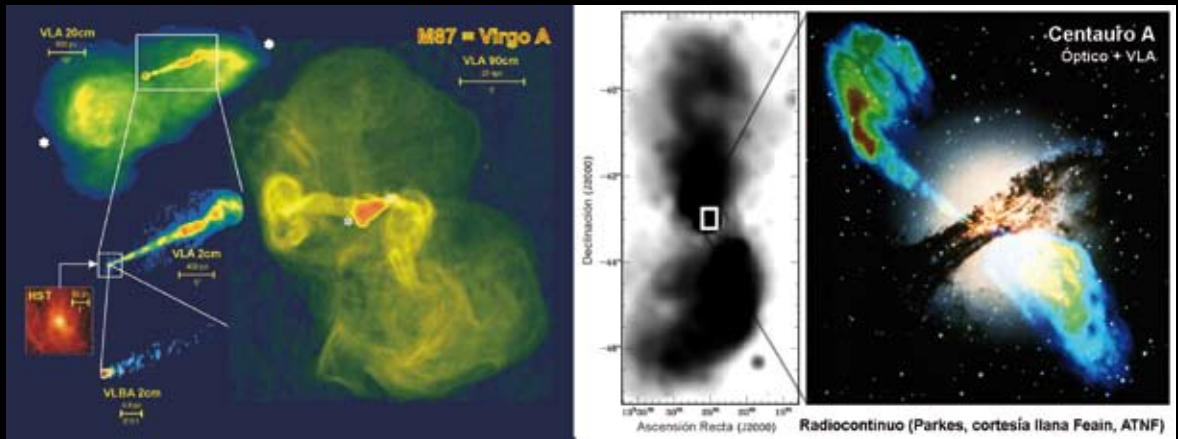
interferómetros han permitido ampliar la resolución angular de las observaciones en HI hasta hacerlas más o menos comparables con las obtenidas en otras frecuencias. En 2001, el astrofísico John Hibbard (NRAO, EE.UU.) compiló más de 200 galaxias observadas con interferómetro radio, *The HI Rogues Gallery*, pero aún no se disponía de un estudio sistemático de una muestra de galaxias cercanas. Ahora, dos grandes proyectos lo están realizando: THINGS y LVHIS.

El proyecto THINGS (*The HI Nearby Galaxy Survey*), liderado por Fabian Walter (MPIA, Alemania), usa datos de VLA para analizar una muestra de 34 galaxias de SINGS dentro del VL cubriendo desde galaxias de baja masa pobres en metales y sin mucha formación estelar hasta espirales masivas. Permitirá resolver estructuras de hasta 500 pc (1.630 años luz), resolviendo los brazos espirales y trazando la estructura fina de HI, además de concretar la rotación de las galaxias. Con ésta, se determinará la masa dinámica y se analizará la cantidad de materia oscura presente en cada sistema.

Por otro lado, el proyecto LVHIS (*Local Volume HI Survey*; se pronuncia «Elvis»), dirigido por la astrofísica Bärbel Koribalski (ATNF, Australia), pretende

mapear en HI galaxias del VL usando el interferómetro ATCA. Los objetivos son investigar los alrededores de las galaxias buscando objetos compañeros de baja masa, concretar la rotación del gas atómico, determinar sus masas y establecer una relación entre la velocidad de rotación y la luminosidad en óptico e NIR (relación Tully-Fisher). Una muestra de galaxias observadas por LVHIS se presenta en la Figura 4: destaca la espectacularidad del gas atómico en M 83, que abarca un diámetro de cerca de un grado (la componente estelar visible en óptico es cinco veces más pequeña) y presenta un brazo de marea que sugiere que ha interactuado con un objeto enano.

Las interacciones entre galaxias se observan muy bien en HI porque el gas atómico suele estar más extendido que la componente estelar y así es perturbado más fácilmente. Los análisis interferométricos de galaxias en HI han revelado estructuras complejas que poco tienen que ver con lo que se observa en otras



frecuencias. Los ejemplos más impactantes son la *Corriente Magallánica* (una nube alargada de gas HI que envuelve las Nubes de Magallanes y se extiende por más de 100° en el cielo, alrededor de la Vía Láctea e interactuando con ella) o la estructura encontrada en el grupo de galaxias de M 81 y M 82 (Figura 5). La cinemática del gas proporciona pistas vitales para entender cómo han ocurrido estas interacciones o fusiones de galaxias.

Otro cartografiado en radio es FIGGS (*Faint Irregular Galaxies GMRT Survey*), que observa una muestra de 65 galaxias enanas del VL con el interferómetro indio GMRT (*Giant Metrewave Radio Telescope*). Estos estudios se verán completados en el futuro con los cartografiados que realizarán ASKAP (*Australia SKA Pathfinder*) y SKA (*Square Kilometre Array*), este último con sensibilidad cien veces superior a la de los interferómetros actuales y que permitirá indagar en el Universo temprano, cuando se encendieron las primeras estrellas y galaxias.

Las ondas de radio milimétricas: el gas molecular

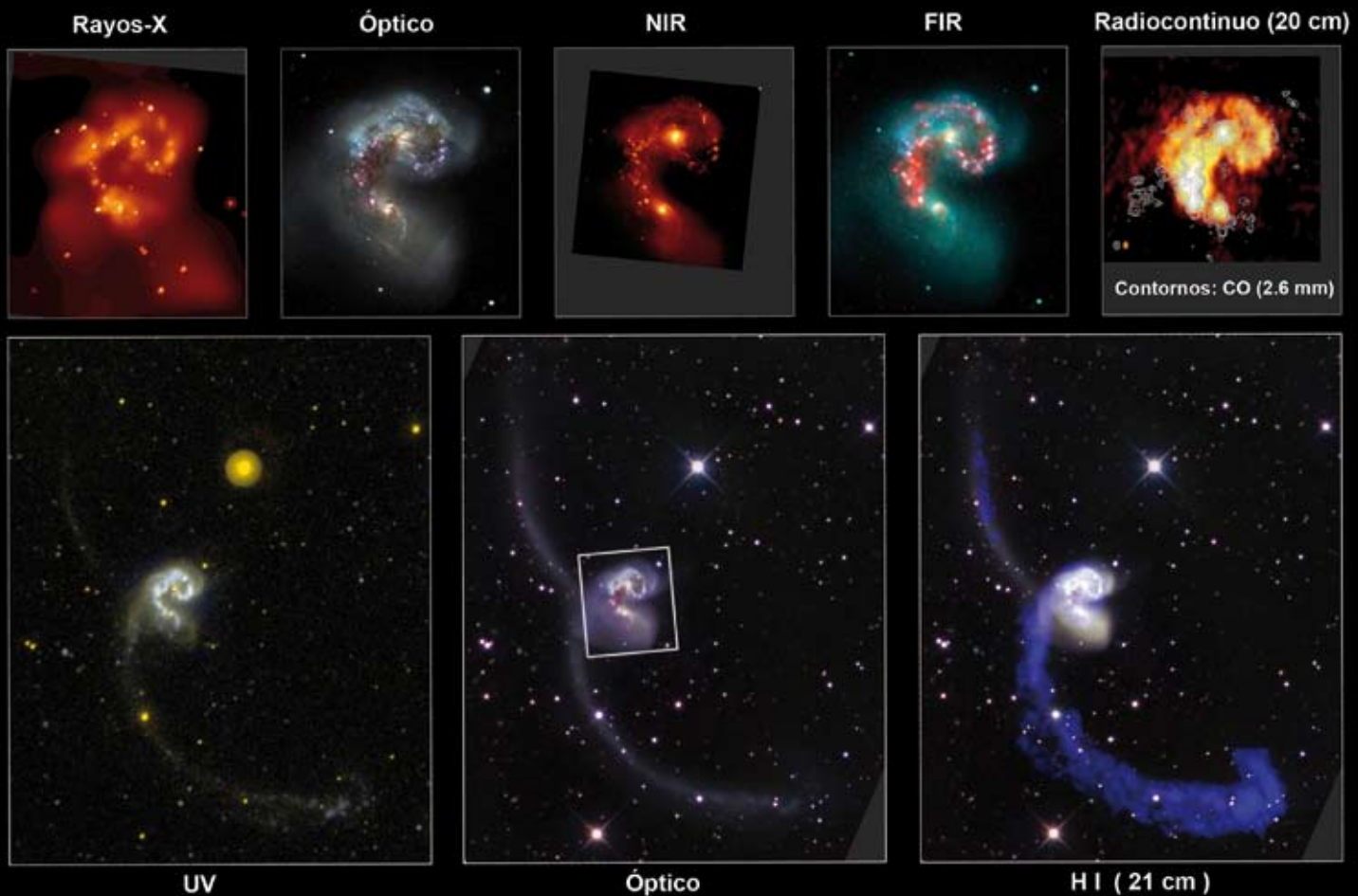
Las zonas más frías y densas de las regiones de formación estelar son las nubes moleculares, objetos

ricos en moléculas como CO, H₂, NH₃ o HCN. Aunque H₂ es la más abundante, su observación es muy difícil porque necesita de temperaturas relativamente altas para excitarse. Así, se suele usar el monóxido de carbono (CO) para trazar la componente molecular de las nebulosas y galaxias. A pesar de las gélidas temperaturas que dominan dichas nubes (10 K), esta molécula *vibra* emitiendo radiación en ondas milimétricas, destacando la emisión en la línea de 2,6 mm. Aunque las observaciones se han limitado a las nubes moleculares de nuestra Galaxia, en los últimos años se ha dado el salto al campo extragaláctico. El gas molecular traza las regiones de formación estelar más densas asociadas a los brazos espirales: de hecho, comparando los datos en óptico y en CO, se observa claramente cómo las bandas oscuras de polvo y gas de las galaxias (incluida la nuestra) emiten prácticamente

44 galaxias espirales del VL obtenidas con BIMA (*Berkeley-Illinois-Maryland Array*, EE.UU.). La emisión del gas molecular junto a la emisión de gas atómico traza muy bien el ritmo de formación de una galaxia (Ley de Schmidt-Kennicutt).

En este rango, un paso de gigantes lo proporcionará el interferómetro ALMA (*Atacama Large Millimetre Array*, Chile), que combinará la luz de 64 antenas de 12 metros de tamaño y verá la luz en 2012. Con una resolución espacial de 10 milisegundos de arco (diez veces mejor que VLA y HST), ALMA revolucionará nuestro conocimiento del Cosmos tanto a escala galáctica (detección de discos planetarios alrededor de estrellas o detalles morfológicos y cinemáticos de las nubes moleculares) como extragaláctica (detectar gas molecular en galaxias con baja metalicidad, resolver la cinemática de núcleos activos de galaxias

Figura 7. Galaxias en interacción NGC 4038/4039, (Las Antenas), en todas las frecuencias. Arriba, detalles de la zona central del sistema observado en rayos X (Chandra), visible (NOAO/HST), NIR (WIRC/PO), FIR (Spitzer) y continuo de radio a 20 cm (VLA), donde se han superpuesto los contornos con la emisión de CO a 2,6 mm (BIMA). Abajo, visión total de las galaxias en UV (GALEX), óptico (SSRO/NOAO) y H I (VLA). Sobre la imagen en óptico se indica



toda la radiación de CO. En la Figura 1 se muestra el mapa de CO de la galaxia M 51 conseguido al combinar los datos de la antena de 30 m de Pico Veleta (Sierra Nevada, España) con los proporcionados por el interferómetro OVRO (*Owens Valley Radio Observatory*, EE.UU.), que permitió determinar la cantidad de turbulencia en sus brazos espirales. El cartografiado BIMA-SONGS (*BIMA Survey of Nearby Galaxies*) ha realizado observaciones en CO de una muestra de

y cuásares o localizar galaxias con formación estelar intensa a distancias cosmológicas).

El continuo de radio: los campos magnéticos

Aún dentro de longitudes de onda de radio, las emisiones de H I a 21 cm o del gas molecular en milimétricas no dejan de ser líneas de emisión a frecuencias determinadas. En realidad, la radiación

el tamaño de las imágenes superiores. La fuerte interacción entre las galaxias ha desatado una intensa formación estelar, que se observa en todas las frecuencias. Se han desarrollado dos colas de marea muy ricas en gas hidrógeno neutro.

emitida en ondas de radio en una galaxia (continuo de radio) es, básicamente, radiación sincrotrón de electrones energéticos moviéndose a lo largo del sistema, acelerados y calentados por los campos magnéticos. Esta *radiación no-térmica* está asociada a fenómenos violetos como explosiones de supernova o núcleos activos de galaxias. Por ejemplo, en M 81 se encuentra una región sobre uno de los brazos espirales que destaca mucho en radio continuo (Figura 5): se trata del resto de la explosión de la supernova SN 1993J. Comparando mapas obtenidos con VLBI (interferometría de muy larga base) durante nueve años se ha podido determinar su velocidad de expansión y estimar una distancia a M 81 de 3,96 Mpc (12,9 millones de años luz).

circundante (como el observado en M 87, Figura 2). Centauro A se encuentra a sólo 4,1 Mpc (13,4 millones de años luz) y alberga el agujero negro supermasivo más cercano. Desde la década de los 80 se sabe que posee alta emisión en radio continuo; es famosa la imagen obtenida con VLA (Figura 6) mostrando los dos lóbulos principales perpendiculares al disco de polvo. Sin embargo, éstos representan menos del 1 % de toda la emisión, que se detecta a una distancia mayor de 4°. Un proyecto liderado por la astrofísica Ilana Feain (ATNF, Australia) está observando esta extensa estructura con ATCA, realizando alrededor de 400 apuntados que luego se combinarán en un mosaico que permitirá estudiarla con detalle.

Emisión en Rayos X: fenómenos violentos

Algunas radiogalaxias también emiten considerable cantidad de rayos X como consecuencia de los choques de las partículas expulsadas a gran velocidad con el medio circundante, calentando el gas a millones de grados. Los rayos X, situados en el extremo opuesto a las ondas de radio en el espectro electromagnético, nos informan de los lugares más violentos del Universo: vientos de estrellas masivas (especialmente, de tipo Wolf-Rayet), estrellas de neutrones, acrecimiento de material en agujeros negros supermasivos y choques de galaxias que desatan una intensa formación estelar.

El rango de los rayos X tampoco es accesible desde la superficie terrestre, por lo que de nuevo es imprescindible el uso de satélites artificiales. Tras el éxito de *Einstein* (HEAO-2, década de los ochenta, que hizo un cartografiado del cielo detectando muchas nuevas fuentes en rayos X) y ROSAT (década de los noventa, dedicado al estudio de objetos individuales), en la actualidad son Chandra (NASA) y XMM-Newton (NASA/ESA) los que examinan el firmamento en estas frecuencias. En la Figura 1 se muestra la emisión en rayos X de la galaxia espiral M 51: aparte de los centros de las dos galaxias destaca una radiación difusa de las nubes calentadas por la presencia del agujero negro supermasivo en el centro de la galaxia principal. En general, se encuentra buena correspondencia entre la emisión de rayos X y los brazos espirales en una galaxia, así como con las regiones H II y el continuo de radio. En algunos casos también es coincidente con el gas atómico.



Figura 8. Imagen de la galaxia starburst M 82 combinando datos en rayos X (Chandra), óptico (HST) y FIR (Spitzer).

En galaxias con formación estelar se encontró una correlación muy evidente entre la formación estelar y su flujo en continuo de radio que, además, está relacionada con el flujo en FIR. Sin embargo, a veces la emisión en radio continuo es muy superior a la esperada: posiblemente estamos ante una radiogalaxia.

Las radiogalaxias son un tipo de galaxias activas que muestran sorprendentes estructuras en radio continuo. Suelen destacar unas regiones dobles (denominadas *lóbulos*), aproximadamente elipsoidales y ocasionalmente simétricas situadas a cada lado del núcleo activo de la galaxia, o *chorros* de material expulsado que interacciona con el medio

En galaxias en interacción, la colisión de las nubes de gas calienta el medio hasta millones de grados, desatando la formación estelar intensa. Un buen ejemplo son *Las Antenas*, dos galaxias en colisión cuya parte central emite gran cantidad de rayos X (Figura 7). Las fuentes puntuales son estrellas de neutrones y agujeros negros, los restos de las explosiones de supernova. Observaciones espectroscópicas en rayos X permiten analizar la química de los elementos pesados creados en estas titánicas explosiones o existentes en las estrellas masivas antes de su muerte.

Observaciones multifrecuencia: uniendo las piezas del puzzle

Como hemos visto, e insistiendo en la idea general aquí desarrollada, sólo realizando observaciones en múltiples frecuencias podemos llegar a comprender la evolución de las galaxias. Una forma gráfica de ilustrarlo es mediante imágenes que combinan frecuencias distintas para cada color. En la Figura 8 tenemos una imagen *multifrecuencia* de M 82. Los datos en óptico (amarillo-verde) muestran el disco de lo que parece una galaxia espiral aparentemente normal. Sin embargo, la emisión del gas ionizado y caliente (naranja) revela la existencia

de unos poderosos vientos galácticos consecuencia del violento brote de formación estelar que sufre el centro de M 82. La acción combinada de las explosiones de supernova y de los intensos vientos de las estrellas masivas expulsa el gas fuera de la galaxia. La imagen en FIR (rojo) indica que no sólo el gas ionizado se escapa del sistema, sino también el polvo. Los choques del material calientan el gas hasta varios millones de grados, emitiendo en rayos X (azul).

No obstante, aunque las observaciones están ahí y la técnica e instrumentación mejoran considerablemente con el paso de los años, aún queda mucho tiempo para que podamos entender completamente el Universo de las galaxias y su evolución, que no deja de ser una búsqueda para intentar comprender nuestros propios orígenes y a nosotros mismos. **A**

1. El proyecto SDSS ha puesto en marcha una iniciativa didáctica, titulada «Galaxy Zoo», para clasificar todas estas galaxias con ayuda de todas las personas interesadas. Más información en <http://galaxyzoo.org/>.

2. Por supuesto, los datos de una sola antena siguen siendo fundamentales: por ejemplo, en 2004 se completó el cartografiado HIPASS (*HI Parkes All-Sky Survey*) que proporciona espectros de emisión de HI de miles de galaxias.



Especialistas en Divulgación y AstroTienda

AstroEduca

¡No se pierda la oposición de Marte!

70€ - Filtro Específico para Marte + 82A Azul y 21 Naranja

Nueva CCD StarShoot

Refrigerada TEC 752 x 582 Pixel

649€

- Sony ExView HAD 429AKL Color
- 1/2" format SONY ICX429ALL-7 Mono

Disponible en Color y Monocroma

KIT CCD

849€

CCD + LRGB + Rueda

> Visite nuestro catálogo On Line

Envíos a toda España

Asesoramiento Profesional

Financiamos su compra

1359€

Clónica EQ6 Pro

Montura ATLAS GT

Disponible en Sytreck

75€

Ocular Reticulado

319€

Rueda y Kit LRGB

599€

Nuevo Prismático BT70

78€

Kit Filtros StarGazer

SkyGlow + Planetaria

185€

Enfocador Dual para newtons Perfil Bajo

70€

Enfocador Accu Focus

Compatible con enfocadores Crayford ED SYNTA

1089€

Oculares Q70

104€

99€

Colimador Deluxe Láser

Láser Pen 5 Mw