

DESPEDIDA AL TELESCOPIO ESPACIAL SPITZER

El pasado 30 de enero se dio por finalizada la misión infrarroja (3.6-160 μ m) del Telescopio Espacial Spitzer, después de más de 16 años de operaciones. Spitzer fue el último de los 4 grandes observatorios espaciales de NASA (los otros tres son Hubble, Chandra y el también retirado Compton) en lanzarse, el 25 de agosto de 2003.



Almudena Alonso Herrero
aalonso@cab.inta-csic.es

Pablo G. Pérez González
pgperez@cab.inta-csic.es

María Morales Calderón
mariamc@cab.inta-csic.es

Unidad de Excelencia María de Maeztu,
Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)

La vida útil de Spitzer estaba inicialmente limitada a 5 años y medio, debido a la duración del criógeno necesario para enfriar los tres instrumentos científicos (IRAC, IRS y MIPS) que llevaba a bordo. Sin embargo, Spitzer continuó operando en las llamadas “misión caliente” y “misión más allá” otros 11 años, aunque solo en las longitudes de onda más cortas (3.6 μ m y 4.5 μ m) del instrumento IRAC.

Durante sus 16 años de vida, Spitzer ha observado multitud de objetos astronómicos, desde nuestro Sistema Solar, regiones de formación estelar, supernovas, discos de polvo alrededor de estrellas y exoplanetas en la Vía Láctea, galaxias cercanas y lejanas llegando a los albores del Universo. Dada la ingente cantidad de observaciones realizadas con Spitzer así como de los innumerables descubrimientos, resulta imposible poder resumirlos de manera exhaustiva. En este artículo discutimos algunos artículos escogidos, entre los casi 9000 publicados con datos de Spitzer, en las tres áreas astronómicas en las que trabajamos. Sin lugar a dudas, el extenso archivo de Spitzer tiene todavía una gran cantidad de ciencia escondida por descubrir en años venideros.

FORMACIÓN ESTELAR Y EXOPLANETAS

Durante los 6 años de misión criogénica, Spitzer proporcionaba, por primera vez, la cobertura en longitud de onda adecuada y la sensibilidad para detectar cantidades de polvo muy pequeñas en las zonas donde se formarían los planetas alrededor de miles de estrellas. Además, gracias a la efectividad de su mapeado, Spitzer nos ha proporcionado imágenes impresionantes de regiones de formación estelar completas (como por ejemplo Orión mostrada en la Figura 1). El estudio de estas regiones ha dado lugar a un incremento enorme del inventario de discos circunestelares y sobre todo de su estadística en cuanto a masa del objeto central, edad, entorno y estado evolutivo. Además, el instrumento IRS obtuvo miles de espectros de discos. Uno de los primeros resultados de estos estudios es la gran diversidad existente de estos discos y la incapacidad de usar un único parámetro (usualmente la pendiente de su distribución espectral de energía en el infrarrojo) para caracterizarlos.

La gran cantidad de estrellas jóvenes que se han observado ha permitido establecer firmemente el tiempo de disipación de los discos primordiales.

Figura 1: Imagen de la nebulosa de Orión tomada con las dos primeras bandas del instrumento IRAC (3.6 μm en azul y 4.5 μm en naranja). Los colores en la imagen reflejan temperaturas relativas y estados evolutivos de miles de estrellas desde meras aglomeraciones de polvo, algunas con potentes chorros estelares (en la parte de arriba de la imagen, la llamada Nube Molecular de Orión 1), hasta las estrellas más calientes de la región correspondientes al cúmulo del Trapecio, en el centro de la imagen. Los vientos y la radiación de estas estrellas han esculpido el polvo circundante. Crédito de la imagen: NASA/JPL-Caltech/J. Stauffer (SSC/Caltech).



Esto era precisamente una de las finalidades de proyectos como “From Molecular Cores to Planet-forming Disks” (c2d: Evans et al. 2003) y “Formation and Evolution of Planetary Systems” (FEPS: Meyer et al. 2006). Ambos estudios concluyen que, 10 Myr es un límite superior firme para su longevidad en torno a estrellas de tipo solar y masas inferiores. La vida de estos discos es unas 2 veces más corta para objetos más masivos debido a una mayor tasa de acreción e irradiación (Calvet et al. 2005). Además, existe una dispersión pequeña en la vida media de los discos circunestelares (2 – 3 Myr) derivada de los estudios en diferentes cúmulos de una edad dada a pesar de la diferencia de tamaño de los cúmulos. Sin embargo, las perturbaciones gravitacionales tienen un papel importante en la evolución de los discos en sistemas binarios cercanos o sistemas múltiples: binarias con separaciones proyectadas de menos de 40 ua tienen la mitad de probabilidades de tener disco en comparación con binarias con separaciones mayores (Cieza et al. 2009). También el entorno tiene un efecto en los discos. La fotoevaporación producida por estrellas masivas erosiona las partes externas de los discos cercanos dejando, normalmente, las regiones más internas intactas afectando incluso a estrellas a decenas de parsecs de distancia.

Sin embargo, aunque no fue creado para ello, la gran estabilidad del telescopio ha hecho que uno de los campos en los que más ha resaltado Spitzer sea quizás el de los exoplanetas. Ya en 2005 observó por primera vez la luz infrarroja a 24 μm del planeta HD 209458b midiendo el paso del mismo por detrás de su estrella (Deming et al. 2005). La profundidad del eclipse nos dice cuánta luz infrarroja emite el planeta, y al combinarlo con el tamaño del mismo obtenemos su temperatura, unos 1100 K. Spitzer ha medido las temperaturas de planetas entre 700 y 3000K pero no puede llegar a temperaturas tan bajas como la de la Tierra. Usando el instrumento IRS se

encontraron nubes altas de polvo pobladas por silicatos en la atmósfera de otro Júpiter caliente, HD 189733b (Grillmair et al. 2007) y más tarde, con IRAC, también se encontraban evidencias de la presencia de vapor de agua (Beaulieu. et al. 2010).

Yendo aún más allá, Spitzer midió la variación de la temperatura en la superficie de un gigante gaseoso y se pudo construir el primer mapa del tiempo de un exoplaneta. Éste mostraba la existencia de vientos atmosféricos con velocidades de miles de kilómetros por hora en algunos casos. Incluso ya en la “misión caliente” Spitzer colaboró en el descubrimiento de un sistema planetario icon 7 planetas! en torno a una estrella muy fría, TRAPPIST-1 (Gillon et al. 2017). Tres de ellos habían sido detectados desde Tierra pero se sospechaba que había más y Spitzer dedicó 25 horas consecutivas de observación para detectar los 4 planetas adicionales. Las órbitas de todos ellos son muy cercanas, entre 1.5 y 12 días. Tres de los planetas parecen estar en la zona habitable, donde podría haber agua en estado líquido.

PROPIEDADES DEL POLVO EN GALAXIAS DEL UNIVERSO LOCAL

La emisión del polvo es una de las componentes fundamentales del espectro infrarrojo de galaxias con formación estelar y galaxias activas (AGN por sus siglas en inglés). La cobertura espectral de Spitzer ha permitido observar la emisión del polvo en forma de continuo y de emisión o absorción de los silicatos y otras especies de polvo (ver más adelante). Además la emisión de moléculas compuestas por carbono e hidrógeno denominadas hidrocarburos poli-cíclicos aromáticos (o PAHs por sus siglas en inglés) domina el espectro de galaxias con formación estelar. Observaciones espacialmente resueltas de galaxias cercanas con Spitzer, han revelado que el polvo caliente y templado (cientos a decenas de grados Kelvin) trazado por la emisión de continuo en $24\mu\text{m}$ y $70\mu\text{m}$ se origina en regiones de formación estelar oscurecida donde el polvo es calentado por las estrellas jóvenes y masivas. A $160\mu\text{m}$ la emisión tiene una apariencia más difusa y puede tener otras contribuciones adicionales además del polvo calentado en regiones HII. Entre los trabajos más destacados cabría mencionar los estudios pioneros de Gordon et al. (2004) de la galaxia M81 y Hinz et al. (2004) de M33 así como los resultados del programa de legado “The

Spitzer Nearby Galaxy Survey” (SINGS: Kennicutt et al. 2003), entre otros. Los PAHs emiten en forma de bandas anchas teniendo los picos más prominentes en 6.2, 7.7, 8.6, y $11.3\mu\text{m}$, además de en $3.3\mu\text{m}$ en el infrarrojo cercano. Aunque la emisión de PAHs en galaxias se había detectado con anterioridad con ISO y telescopios de tierra, Spitzer los observó en un gran número y tipo de galaxias hasta distancias cosmológicas. En galaxias con metalicidades altas e intermedias, la emisión de los PAH puede alcanzar el 10% de la emisión total en el infrarrojo. Además, Peeters et al. (2004) demostró que emisión de los PAH está fundamentalmente excitada por fotones UV emitidos por estrellas de tipo B y por lo tanto son trazadores de la formación estelar reciente. Estas propiedades del polvo han permitido derivar nuevas calibraciones de la tasa de formación estelar (SFR, por sus siglas en inglés) oscurecida usando la emisión de los PAHs y diferentes emisiones monocromáticas de continuo infrarrojo así como combinaciones con trazadores ópticos y ultravioleta (ver por ejemplo, Calzetti et al. 2007, Kennicutt et al. 2009, Rieke et al. 2009).

Uno de los resultados más inesperados fue la detección con Spitzer de emisión de PAHs en el superviento observado perpendicular al disco de la galaxia *starburst* M82 (Figura 2, las observaciones de Spitzer fueron publicadas por primera vez en Engelbracht et al. 2006). La emisión a $8\mu\text{m}$ observada por el instrumento IRAC se extiende al menos 6 kpc en el eje menor de la galaxia y demuestra que el polvo y los PAHs pueden sobrevivir en condiciones tan extremas como los supervientos asociados a formación estelar intensa. La emisión de los PAHs se ha detectado también en las regiones centrales de galaxias activas cercanas desde las menos luminosas como las galaxias Seyfert hasta cuásares (se muestra un ejemplo en la Figura 3). En general se observa que la emisión de los PAH aparece diluida en AGN comparada con la emisión en galaxias con formación estelar. Esto es debido en parte al intenso continuo producido por polvo calentado por el AGN pero probablemente también a diferentes condiciones físicas que pueden alterar la química de los PAHs pero que no los destruyen completamente. La emisión de los PAHs ha permitido derivar las SFRs en las regiones circunnucleares de galaxias Seyfert y demostrar que están correlacionadas con la tasa de acreción de los agujeros negros



Figura 2: Visión multifrecuencia de la galaxia M82. En rojo es la emisión de los PAHs observada con el instrumento IRAC de Spitzer a $8\mu\text{m}$ y en azul es la emisión en rayos X observada con Chandra. Ambas emisiones trazan fundamentalmente el superviento perpendicular al disco de la galaxia trazado por emisión en el óptico observada con Hubble en colores naranja y verde. Crédito de la imagen: NASA/JPL-Caltech/STScI/CXC/UofA/.

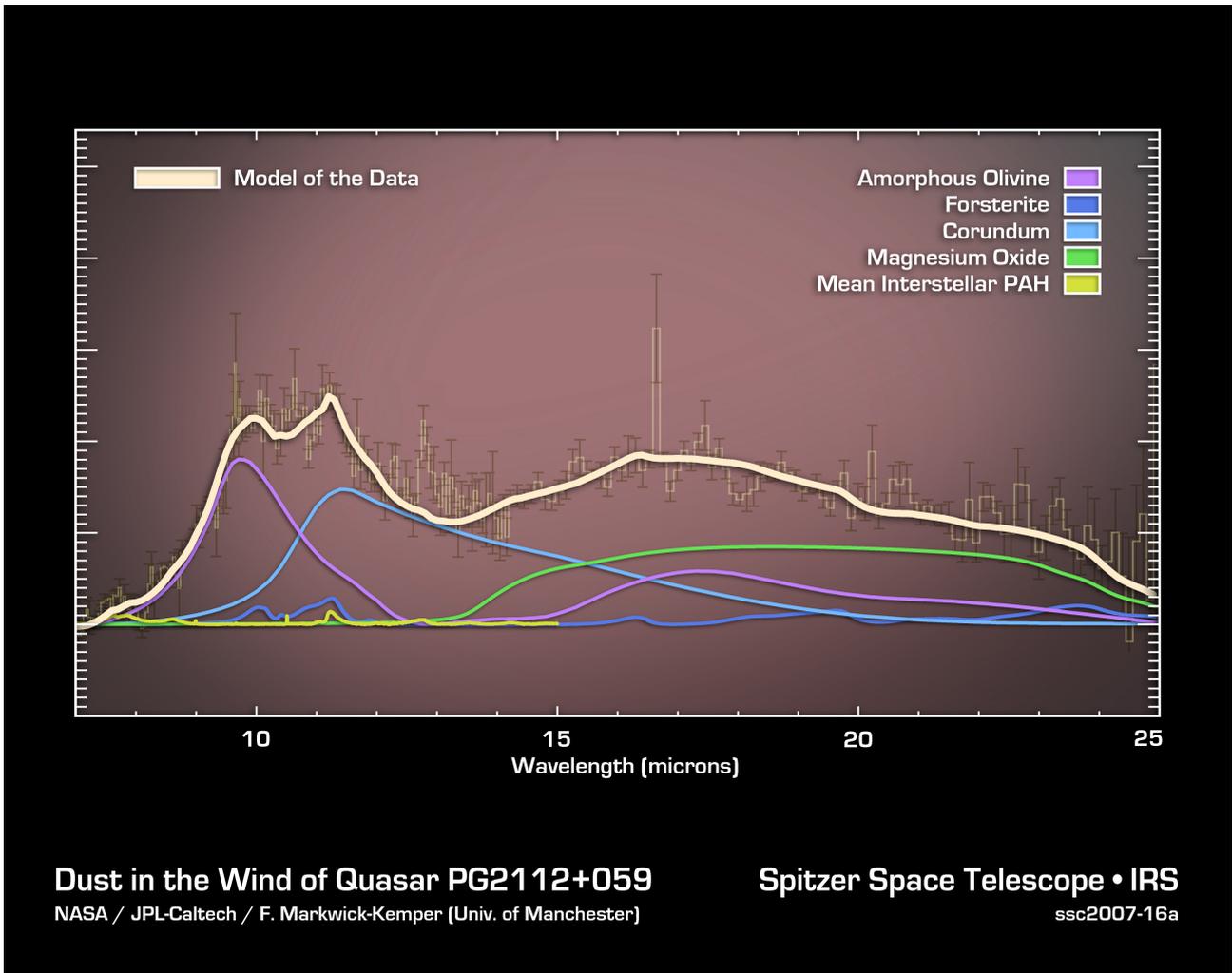


Figura 3. Composición del polvo en el viento del cuásar PG2112+059 ($z=0.466$) derivado a través de la modelización del espectro infrarrojo medio observado con el instrumento IRS de Spitzer. La olivina (silicato amorfo) tiene la mayor contribución, pero también se detectan óxidos y silicatos cristalinos. En este cuásar se puede observar que la emisión de los PAHs es débil pero no ausente. Crédito de la imagen: NASA/JPL-Caltech/F. Markwick-Kemper (University of Manchester).

«Aunque no fue creado para ello, la gran estabilidad del telescopio ha hecho que uno de los campos en los que más ha resaltado Spitzer sea quizás el de los exoplanetas»

supermasivos (Diamond-Stanic & Rieke 2012). Esto sugiere una conexión entre el gas que forma estrellas en escalas físicas de menos de 1 kpc y el gas que contribuye al crecimiento del agujero negro en escalas mucho menores que 1 pc.

Las teorías actuales predicen que la formación del polvo en el Universo Local tiene lugar en estrellas evolucionadas de tipo AGB. Sin embargo, observaciones (sub)milimétricas muestran la existencia de polvo a edades tempranas del Universo. Entre los mecanismos adicionales de formación de polvo, se han propuesto los vientos energéticos producidos en cuásares. Observaciones espectroscópicas con Spitzer e instrumentos de tierra han mostrado la presencia de polvo debido a granos de silicatos en la mayoría de galaxias activas. Además en algunos cuásares con potentes *outflows* la modelización de los espectros de Spitzer permite estimar la composición del polvo, como se puede apreciar en la Figura 3 (el resultado fue publicado en Markwick-Kemper et al. 2007). Estos descubrimientos sobre las propiedades del polvo en diferentes tipos de galaxias hacen necesaria la revisión de los modelos de formación, supervivencia y destrucción de los granos de polvo y PAHs en el medio interestelar, y en especial en los ambientes más hostiles como son los supervientos galácticos y las regiones centrales de galaxias activas.

EXPLORACIONES COSMOLÓGICAS

Los tres parámetros físicos más relevantes que hemos utilizado históricamente para estudiar la formación y evolución galaxias son el desplazamiento al rojo, la masa estelar y la SFR. Antes del lanzamiento de Spitzer en 2003, las exploraciones de galaxias más relevantes tenían importantes limitaciones en la estimación de esas tres propiedades. Spitzer supuso una revolución que todavía hoy, 16 años después de que se empezara a tomar datos, sigue vigente y lo convierte en uno de los telescopios más relevantes (quizás solo por detrás de Hubble) para el estudio de galaxias a distancias cosmológicas, a pesar de sus solo 85 cm de diámetro.

En cuanto al desplazamiento al rojo se refiere, exploraciones en el óptico con Hubble y con telescopios terrestres muestrearon en los primeros años de este siglo áreas de cielo del orden unos cientos, in-

cluso miles, de arcominutos cuadrados, permitiendo la detección de galaxias hasta desplazamientos al rojo en torno a $z=3-4$. Estas exploraciones contaron con considerables incertidumbres y degeneraciones en los desplazamientos al rojo fotométricos, que intentaban solucionarse con datos en el infrarrojo cercano tomados desde tierra. Spitzer, con su instrumento IRAC, permitió la obtención de imágenes extremadamente profundas, típicamente hasta magnitudes en torno a 25-26 ABmag en 3.6 y 4.5 μm en decenas de grados cuadrados (igual que los datos más profundos de banda K desde tierra, como los de ULTRAVista), e incluso llegando a más de 28 ABmag en zonas de cielo del orden de un grado cuadrado (con exploraciones como CANDELS, S-COSMOS, SpUDS, SWIRE). Estas imágenes infrarrojas en grandes áreas de cielo, tomadas con una rapidez sin precedentes, siguen a día de hoy estando muy por encima de las capacidades en el infrarrojo cercano desde tierra, y permitieron una mejora sustancial de las estimaciones de distancias para galaxias con formación estelar y AGN (Ilbert et al. 2009, Salvato et al. 2009, Barro et al. 2019) y una extensión de los trabajos de caracterización de galaxias hasta más allá de la época de reionización (Ouchi et al. 2009, de Barros et al. 2019).

Los datos IRAC de gran calidad mencionados en el párrafo anterior facilitaron el acceso al infrarrojo óptico y cercano en reposo, el mejor *proxy* que conocemos para determinar masas estelares, para galaxias hasta desplazamientos al rojo en torno a $z=4-5$. Eso permitió obtener resultados tan relevantes como la caracterización del ensamblado de la masa estelar durante el 90% de la historia del Universo (Pérez-González et al. 2008, Marchesini et al. 2009, Muzzin et al. 2013, Stefanon et al. 2017). Incluso las galaxias más distantes que conocemos en la actualidad, por encima de $z\sim 8$, en su mayor parte descubiertas con técnicas de detección del *break* de Lyman usando datos ultra-profundos del Hubble, cuentan con contrapartidas Spitzer/IRAC (de Barros et al. 2019, Figura 4), aunque la extracción de flujos requirió un importante esfuerzo en el desarrollo de técnicas de deconvolución de imágenes espaciales (Laidler et al. 2007, Guo et al. 2013). Todavía hoy en día los datos IRAC son los más profundos en el infrarrojo, con centenares y miles de fuentes extremadamente débiles en otras longitudes de onda que aún no

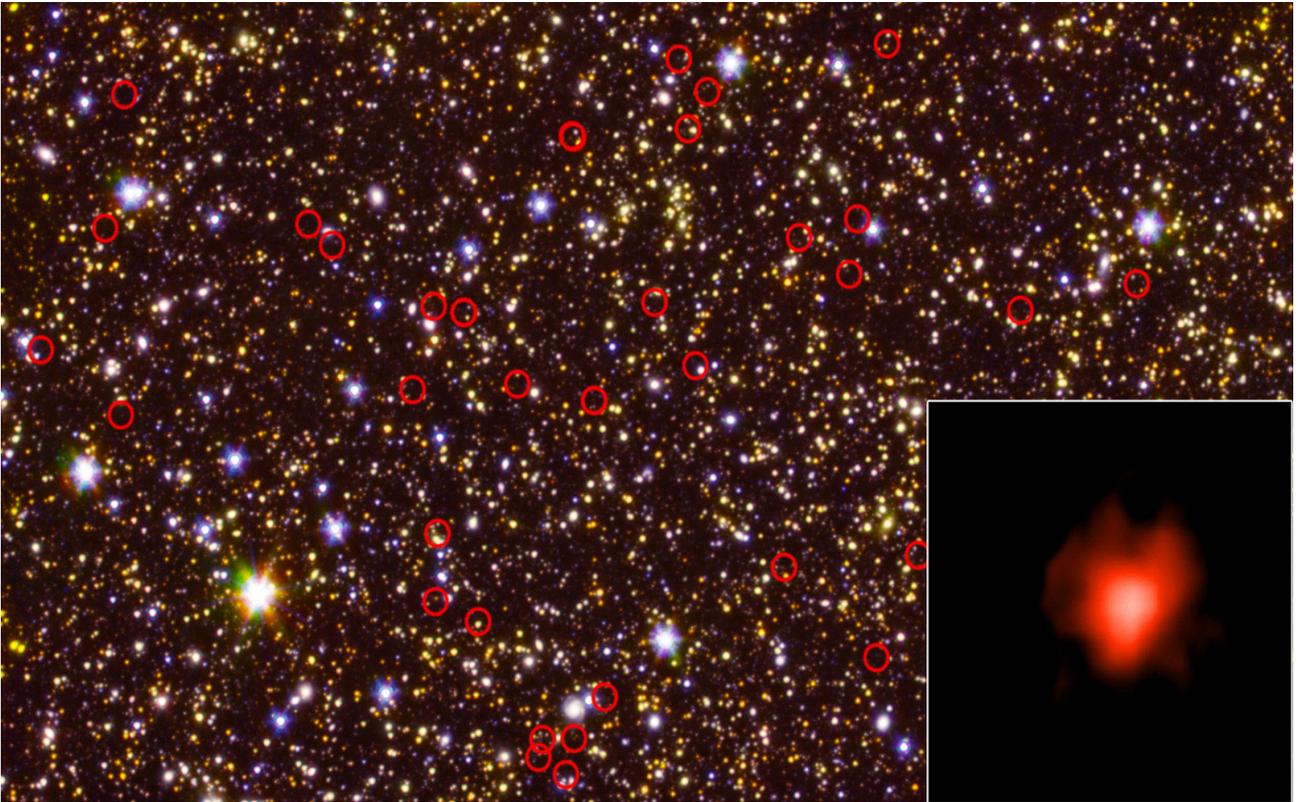


Figura 4: Imagen RGB de uno de los campos más profundos observados por Spitzer con su instrumento IRAC (GOODS/GREATS). Con círculos rojos se marcan candidatos de galaxias a $z \sim 8$. En la parte inferior derecha se muestra un zoom sobre uno de estos objetos (de Barros et al. 2019). Crédito de la imagen: NASA/JPL-Caltech/ESA/Spitzer/P. Oesch/S. De Barros/ I. Labbe.

han sido catalogadas ni caracterizadas (Wang et al. 2016, Alcalde Pampliega et al. 2019). Seguramente esas fuentes serán el pan nuestro de cada día cuando JWST obtenga datos, pero hoy permanecen escondidas entre el ruido y la confusión de los datos IRAC, esperándonos en el archivo Spitzer.

Finalmente, en lo que respecta a las SFRs de galaxias a distancias cosmológicas, Spitzer también ha sido un observatorio rompedor, gracias esta vez a su instrumento MIPS. El efecto más dramático que afecta a la determinación de esta propiedad física es la atenuación por polvo interestelar, más importante en las regiones más activas. MIPS permitió extender hasta desplazamientos al rojo en torno a $z \sim 3$ y SFRs tan bajas como $3M_{\odot}/\text{yr}$ a $z \sim 1$ (cercana a la de la Vía Láctea) y $30M_{\odot}/\text{yr}$ a $z \sim 2$ (típico de galaxias *starbursts* como M82, Figura 2)

los trabajos pioneros en el infrarrojo de IRAS e ISO. Esto permitió confirmar el incremento de densidad de tasa de formación estelar cósmica desde $z=0$ a $z=1$ (Le Floc'h et al. 2005) así como cuantificar su evolución con un estimador no afectado por la extinción del polvo hasta $z \sim 3$, es decir, durante el 80% de vida del Universo (Pérez-González et al. 2005). Asimismo, junto con IRAC, permitió hacer el primer censo extenso de galaxias con AGNs oscurecidos, una de las fases más relevantes en la evolución de agujeros negros supermasivos y de sus galaxias anfitrionas (Alonso-Herrero et al. 2006, Donley et al. 2012). Aún hoy los datos de MIPS siguen siendo los más sensibles a la formación estelar rodeada polvo a distancias cosmológicas y han servido de base para exploraciones complementarias en el infrarrojo lejano con telescopios como Herschel o antenas (sub)milimétricas.

Sobre los autores: Almudena Alonso Herrero y Pablo G. Pérez González trabajaron en el equipo responsable del instrumento MIPS en la Universidad de Arizona durante 2001-2003 y 2003-2006, respectivamente, participando en la caracterización del instrumento así como en las actividades de comisionado del instrumento en órbita. Fueron además miembros del equipo científico de MIPS, publicando artículos sobre galaxias cercanas y lejanas con datos de MIPS, IRAC e IRS. María Morales Calderón trabajó con el equipo responsable de IRAC en el Spitzer Science Center durante 2006 y 2009-2012 participando en la caracterización de los artefactos en las imágenes de IRAC. Además participó en dos grandes proyectos de “Exploration Science” estudiando la parte interna de los discos circunestelares a través de su variabilidad en el infrarrojo.

REFERENCIAS

- Alcalde Pampliega et al. 2019, ApJ, 876, 135
- Alonso-Herrero et al. 2006, ApJ, 640, 167
- Barro et al. 2019, ApJS, 243, 22
- Beaulieu et al. 2010, MNRAS, 409, 963
- Calvet et al. 2005, AJ, 129, 935
- Calzetti et al. 2007, ApJ, 666, 870
- Cieza et al. 2009, ApJ, 696, L84
- de Barros et al. 2019, MNRAS, 489, 2355
- Deming et al. 2005, Nature, 434, 740
- Diamond-Stanic & Rieke 2012, ApJ, 746, 168
- Donley et al. 2012, ApJ, 748, 142
- Engelbracht et al. 2006, ApJ, 642, L127
- Evans et al. 2003, PASP, 115, 965
- Gillon et al. 2017, Nature, 542, 456
- Gordon et al. 2004, ApJS, 154, 215
- Grillmair et al. 2007, ApJ, 658, L115
- Guo et al. 2013, ApJS, 207, 24
- Hinz et al. 2004, ApJS, 154, 259
- Ilbert et al. 2009, ApJ, 690, 1236
- Kennicutt et al. 2003, PASP, 1145, 928
- Kennicutt et al. 2009, ApJ, 703, 1672
- Laidler et al. 2007, PASP, 119, 1325
- Le Floch et al. 2005, ApJ, 632, 169
- Marchesini et al. 2009, ApJ, 701, 1765
- Markwick-Kemper et al. 2007, ApJ, 668, L107
- Meyer et al. 2006, PASP, 118, 1690
- Muzzin et al. 2013, ApJ, 777, 18
- Ouchi et al. 2009, ApJ, 706, 1136
- Peeters et al. 2004, ApJ, 613, 986
- Pérez-González et al. 2005, ApJ, 630, 82
- Pérez-González et al. 2008, ApJ, 675, 234
- Rieke et al. 2009, ApJ, 692, 556
- Salvato et al. 2009, ApJ, 690, 1250
- Stefanon et al. 2017, ApJ, 843, 36
- Wang et al. 2016, ApJ, 816, 84

«Estas imágenes
infrarrojas en grandes
áreas de cielo, tomadas
con una rapidez sin
precedentes, siguen a día
de hoy estando muy por
encima de las capacidades
en el infrarrojo cercano
desde tierra»