SEA

Sociedad Española de Astronomía

36 Verano 2017

Portada: Vista panorámica de Chajnantor con las antenas de ALMA (Atacama Large Millimeter/ submillimeter Array) en contraste con un cielo nocturno plagado de estrellas.
Créditos: ESO/B. Tafreshi (twanight.org).

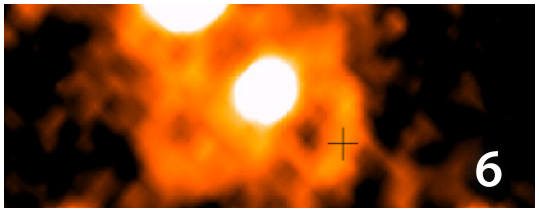
Comité editorial:
Antxon Alberdi Odriozola
Nuria Huélamo
José María Diego
Marc Ribó
Íñigo Arregui Uribe-Echevarría
Fernando J. Ballesteros Roselló
Amelia Ortiz Gil

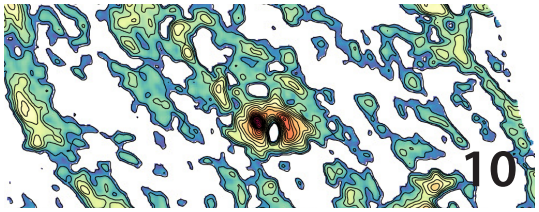
Diseño:
Fernando J. Ballesteros Roselló
Vicent Peris Baixauli

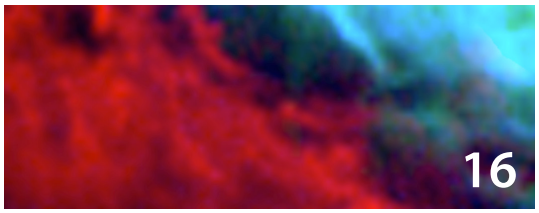
Maquetación:
Fernando J. Ballesteros Roselló

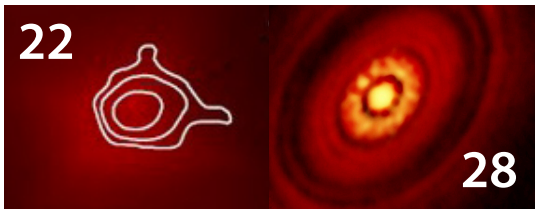
Sociedad Española de Astronomía SEA
www.sea-astronomia.es
Comisión de Información
comi-info@sea.am.ub.es

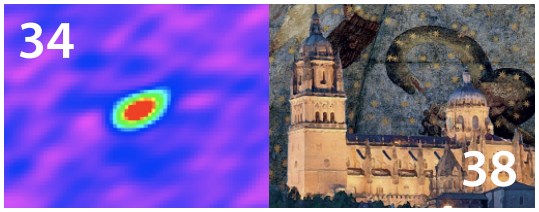
CONTENIDOS

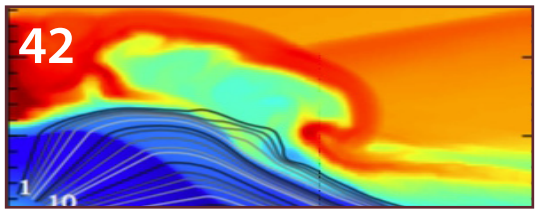












5 Editorial

6 Observando el nacimiento de los chorros relativistas en agujeros negros supermasivo

10 ALMA: resolviendo los 'toros' de los AGN

16 Rugosidades en la “piel” de Orión

22 Observaciones de nebulosas planetarias con ALMA: Gas en expansión y en rotación

28 La formacion de un sistema planetario en miniatura

34 Las enanas marrones a través del observatorio ALMA

38 En marcha la XIII Reunión Científica de la SEA: Salamanca 2018

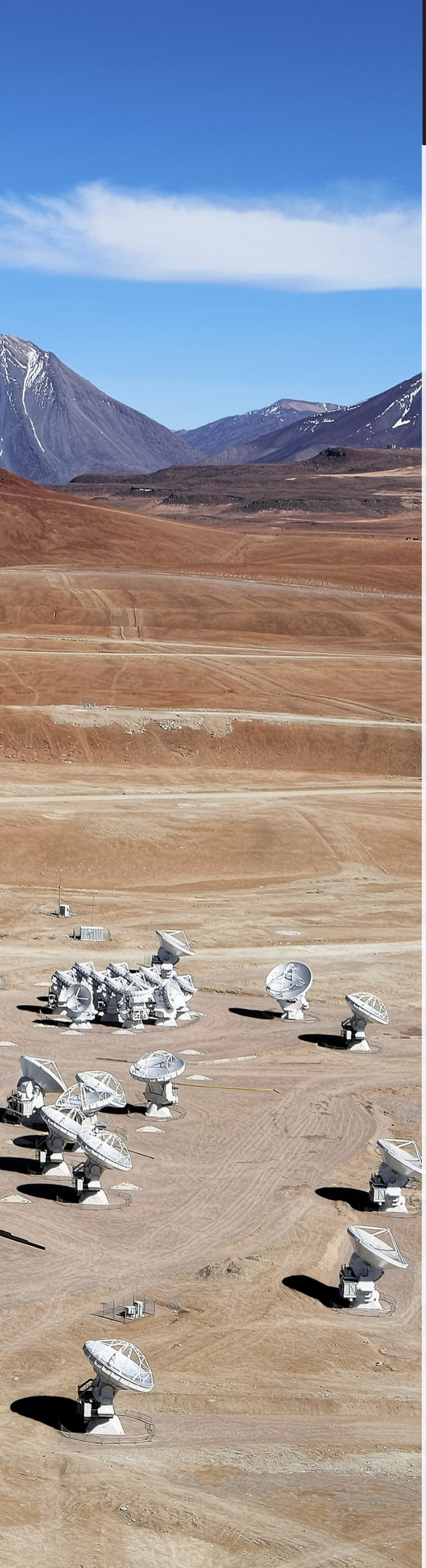
40 Ecos de (la) Sociedad

41 Libros

42 Tesis doctorales

Número 36, Verano 2017

Vista aérea de las antenas de ALMA en el llano de Chajnantor. En el centro de la imagen se aprecia el volcán Juriques. Crédito: Clem & Adri Bacri-Normier (wingsforscience.com)/ESO.



EDITORIAL

El 13 de marzo de 2013 se inauguraba oficialmente el interferómetro ALMA, ubicado en el desierto de Atacama en Chile. Las observaciones habían comenzado ya unos meses antes, por lo que a finales de 2016 se celebró un congreso que conmemoraba los 5 años de ciencia con ALMA. Trabajando a longitudes de onda milimétricas y sub-milimétricas, ofrece una visión detallada del Universo frío, allí donde el polvo y las moléculas emiten su radiación. Siendo España ya miembro del Observatorio Europeo Austral (ESO, los astrónomos españoles han sido exitosos en la obtención de tiempo de observación desde la primera llamada de propuestas realizada en 2011 para la denominada "ciencia temprana". Han publicados numerosos artículos sobre la ciencia más variada, desde los detalles del nacimiento de las estrellas a la formación de las primeras galaxias en el Universo.

Este Boletín quiere celebrar este cumpleaños y lo hace mostrando los resultados que han obtenido algunos de nuestros compañeros con ALMA y que los han publicado como primeros autores de los artículos de investigación. Ofrece una panorámica diversa sobre la Astrofísica actual: Iván Martí-Vidal mide el intenso campo magnético en la vecindad del agujero negro central de un núcleo activo de galaxia (AGN); Santiago García-Burillo traza el viaje del gas desde el disco gaseoso de la galaxia anfitriona hacia el disco de acreción de un agujero negro supermasivo; Javier Goicoechea muestra la cinemática del gas molecular en las regiones de formación estelar; Valentín Bujarrabal estudia el gas en expansión y rotación en las nebulosas planetarias: Mayra Osorio cartografía un disco de transición en miniatura alrededor de la estrella XZ Tau B; Nuria Huélamo estudia las enanas marrones, tratando de clarificar su origen. Son todos artículos con resultados espectaculares, con ALMA como ingrediente observacional fundamental.

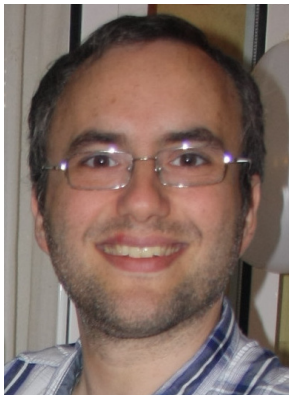
La XIII reunión científica de la SEA de 2018 se celebrará en Salamanca, coincidiendo con el octavo centenario de la Universidad de Salamanca. Damos en el Boletín las primeras noticias sobre la reunión. En breve se enviará la primera circular con la información básica. ¡No olvidéis anotar las fecha en vuestra agenda!

Desde el equipo editorial queremos desearos un feliz verano a todos.

Antxon Alberdi
Instituto de Astrofisica de Andalucia (CSIC)

OBSERVANDO EL NACIMIENTO DE LOS CHORROS

La "zona de lanzamiento" de los chorros relativistas en los núcleos activos de galaxia (AGN) se sitúa en las inmediaciones del horizonte de sucesos de los agujeros negros centrales. Esta región es el escenario de procesos astrofísicos extremos, donde la Relatividad General interactúa con la magneto-hidrodinámica en condiciones que sólo pueden estudiarse a través de observaciones astronómicas. Obtener información directa de estas regiones ha sido prácticamente una quimera observacional hasta hace relativamente poco. La interferometría (sub)milimétrica de nueva generación, con ALMA y el Event Horizon Telescope (EHT) como buques insignia, está siendo transformacional en este campo. En este artículo, describo los primeros resultados que ALMA reportó en el campo de los chorros relativistas en AGN.



Iván Martí Vidal
Onsala Space Observatory,
Chalmers University of Technology (Suecia)
ivan.marti-vidal@chalmers.se

Actualmente, solo una pequeña fracción de AGNs ha sido detectada a longitudes de onda radio. Dicha emisión, de origen no-térmico, procede de enormes chorros de plasma (ultra)relativista, que nacen en las cercanías del agujero negro central y pueden propagarse hasta distancias intergalácticas. Parte de los detalles íntimos de los procesos de producción de estos chorros relativistas sigue siendo un misterio. A día de hoy, sabemos que los campos magnéticos deben jugar un papel esencial, tanto en la aceleración del plasma desde la base misma del chorro, en las inmediaciones del horizonte de sucesos, como en su colimación a lo largo del chorro. No obstante, los campos magnéticos pueden actuar de diferentes formas a la hora de inyectar el plasma en el chorro, ya sea a través del disco de acrecimiento, "arrestado" magnéticamente, o incluso a través de la extracción de energía rotacional del agujero negro desde el interior de su ergosfera.

Las principales limitaciones con que nos encontramos a la hora de estudiar estos fascinantes escenarios astrofísicos son actualmente observacionales. Disponemos de multitud de modelos y simulaciones detalladas de estos objetos, pero la detección de señales directas procedentes de la base de los chorros relativistas es muy elusiva. El pequeño tamaño angular de estas regiones, unido a la alta autoabsorción sincrotrón en la zona, nos obliga a observar a longitudes de onda sub-milimétricas y/o a resoluciones angulares solo alcanzables con técnicas de interferometría astronómica. Además, la relativamente baja sensibilidad de los telescópios sub-milimétricos (obviamente hasta la llegada de ALMA) ha sido un obstáculo imposible de salvar en los estudios observacionales de las zonas de lanzamiento de los chorros en AGN.

PKS 1830-211 CON ALMA

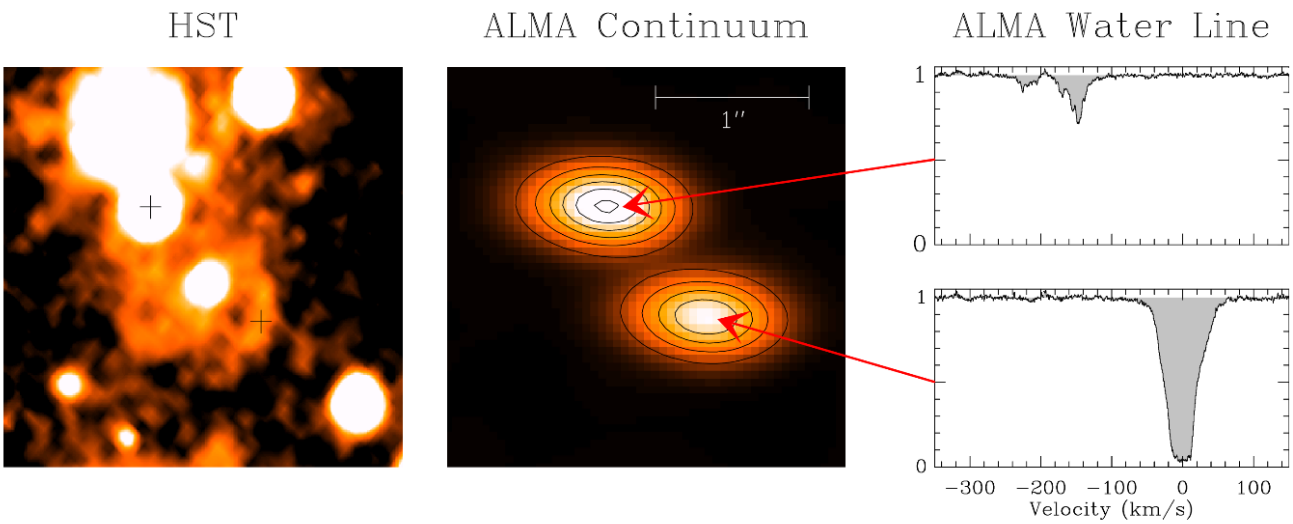
De todo el Universo conocido, la fuente PKS 1830-211 es una de las dos únicas lentes gravitatorias que, además de generar varias imágenes del mismo AGN de fondo, muestra líneas moleculares de absorción (decenas de ellas), producidas por las nubes moleculares de la galaxia que actúa de lente. Esta configuración tan especial convierte a PKS 1830-211 en una valiosísima fuente con enorme potencial en muchas ramas de la astrofísica: cosmología, formación estelar (a través del tiempo

cósmico), medio interestelar, altas energías (el AGN de fondo es un emisor γ muy variable) y, como no, física de AGNs. En la Figura 1 se muestra la fuente PKS 1830-211 con el HST (izquierda) y con ALMA, a una longitud de onda de 1 mm (centro). La alta resolución de ALMA nos permite resolver las dos imágenes principales producidas por la lente (separadas por un segundo de arco), así como los espectros de absorción en cada una (derecha). La luz de la imagen noreste, NE, llega unos 27 días antes que la de la suroeste, SW, por lo que cualquier variabilidad en el AGN de fondo causará cambios en el contraste entre NE y SW.

Nuestras observaciones de PKS 1830-211 con ALMA comenzaron en 2012. Nuestra idea era estudiar la forma y variabilidad de las líneas de absorción para aprender sobre la química (p. ej., ratios isotópicos) en el Universo lejano (corrimiento al rojo de ~0.9). Como subproducto, la alta sensibilidad y resolución angular de estas observaciones nos permitieron estudiar la variabilidad entre las imágenes de la lente (o sea, el "contraste", o intensidad relativa de una imagen respecto de la otra), tanto en intensidad total (precisiones de pocas partes entre mil [1], como en polarización [2]. Mostramos algunos resultados en la Figura 2. Por una parte, la diferencia entre los espectros de las dos imágenes (y su evolución temporal) es bien clara (izquierda). Por otra parte, y usando una novedosa técnica de análisis (la "polarimetría diferencial dual" [3]) también detectamos una clara diferencia entre los ángulos de polarización de las dos imágenes, así como una intrigante dependencia espectral (vía λ^2) de dicha diferencia.

Hemos de notar que una lente gravitatoria no produce efectos cromáticos ni afecta al ángulo de polarización (en tanto en cuanto el objeto de fondo sea acromático y el alineamiento entre la lente y el objeto no cambie en escalas cortas de tiempo, respectivamente). Es por ello que los resultados obtenidos con ALMA deben estar relacionados con la cromaticidad de la fuente de fondo, así como con su eventual dependencia temporal. De hecho, es el retraso de 27 días entre las imágenes NE y SW, unido a la variabilidad intrínseca del AGN (en intensidad y polarización), el que produce los cambios de contraste detectados con ALMA.

Figura 1: La lente gravitatoria (y absorbente molecular) de PKS 1830-211. La galaxia lente puede apreciarse en los datos del HST (es el pico de intensidad entre las imagenes de la lente, denotadas por +). Parte del resto de fuentes detectadas por el HST son probablemente estrellas de campo. Figura cortesía de S. Muller.



VARIABILIDAD Y POLARIMETRÍA EN LA BASE DEL CHORRO

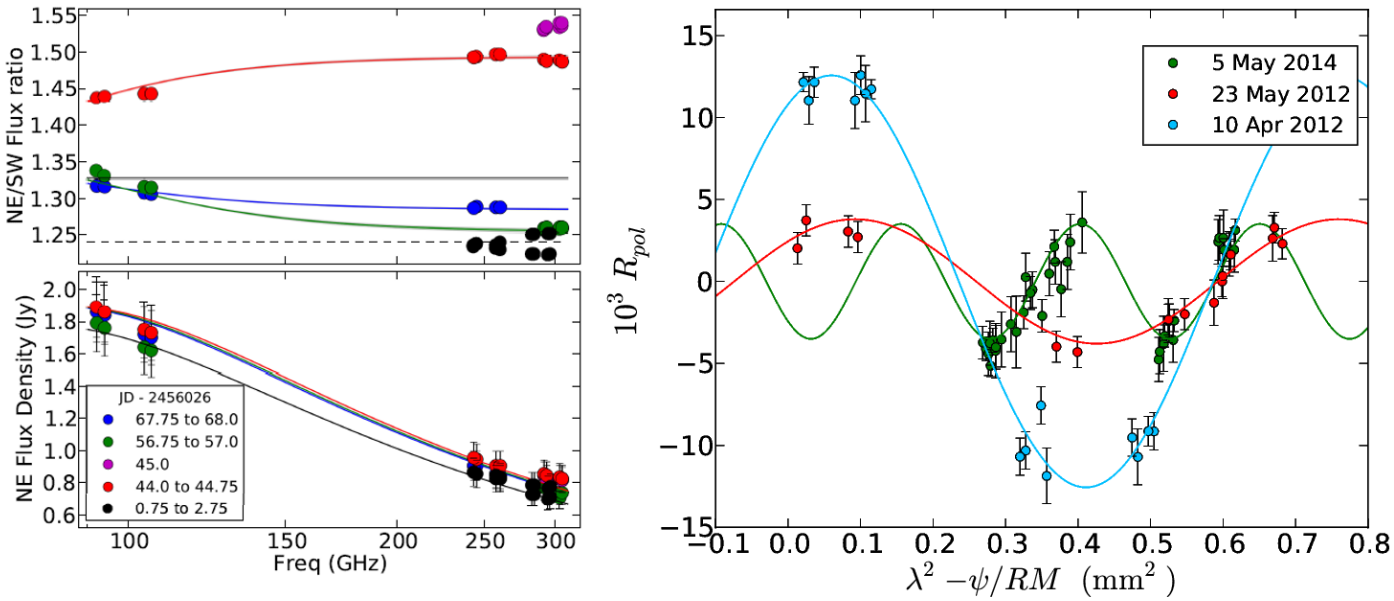
Los cambios de contraste (a cada frecuencia) pueden ser ajustados con un modelo simplificado de chorro con autoabsorción sincrotrón, en el que una sobredensidad de plasma (o un choque propagándose a lo largo del chorro), cruza la región ópticamente gruesa a las frecuencias de ALMA (a pocos miliparsec de la base del chorro). Como mostramos en la Figura 2 (izquierda), el ajuste es excelente, aunque debe imponerse una geometría cóncava para el chorro (tal y como se espera, de hecho, para la base del chorro). Además, nuestro modelo predice que la sobredensidad de plasma debió inyectarse en la base del chorro en una época que resulta coincidir (con un margen de menos de una semana) con un episodio de intensa emisión de rayos γ detectado con el satélite Fermi-LAT (Figura 3), probablemente relacionado con el proceso Compton inverso actuando sobre el campo de fotones en la región de la base del chorro. Hemos de notar que la coincidencia entre las observaciones de ALMA y este interesante evento en el chorro de PKS 1830-211 fue pura serendipia.

En cuanto a la polarimetría diferencial entre las dos imágenes, es notable su dependencia con la frecuencia, a partir de la cual puede estimarse la rotación de Faraday en dirección a la base del chorro a longitudes de onda sub-milimétricas (0.3 mm, corregido por corrimiento al rojo), algo nunca antes conseguido en ningún AGN. La Medida de Rotación ($RM = \Delta\phi/\Delta\lambda^2$) estimada a partir de nuestras observaciones es del orden de 10^8 rad/m^2 (corregida por corrimiento al rojo), la más alta jamás medida en el Universo. Estos resultados indican la presencia de intensos campos magnéticos paralelos a la línea de visión (es decir, prácticamente paralelos a la dirección del chorro), tal y como predicen los modelos actuales de formación de chorros relativistas a partir de la extracción de energía de rotación del objeto central.

EN RESUMEN

ALMA aún se encuentra en la fase de ciencia temprana (Early Science, ES). Aún así, ya está proporcionando resultados transformacionales en multitud de ramas de la astrofísica. En el campo de los

Figura 2: Izquierda, cambios de contraste entre las imágenes NE y SW (arriba) y densidades de flujo de la imagen NE. Derecha, contraste de polarización (o "polarización diferencial dual"; ver [2,3]) para distintas épocas.

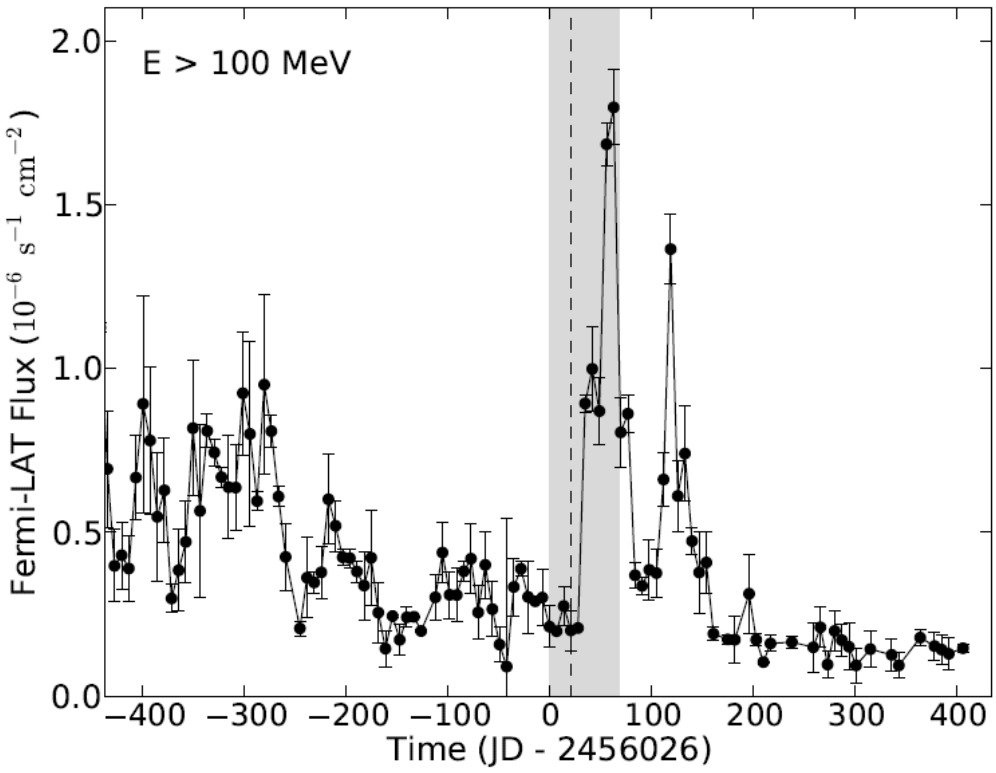


chorros relativistas en AGNs, la colaboración entre ALMA y el EHT nos dará pronto históricos frutos, resolviendo directamente las zonas de producción de chorros (e incluso las "sombras" producidas por las fotonesferas) de los agujeros negros supermasivos más cercanos. Pero incluso por sí solo, el telescopio ALMA también nos brinda oportunidades únicas en el estudio de la variabilidad (y polarimetría) de AGNs a longitudes de onda (sub)milimétricas, en ventanas de sensitividad que hace solo unos años eran impensables (pocas partes entre un millar, para el caso de PKS 1830-211).

REFERENCIAS

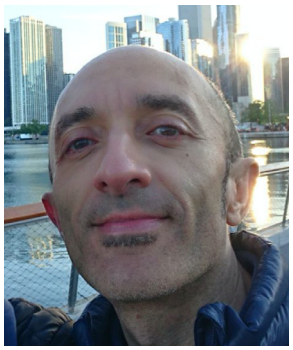
[1] Mart-Vidal et al. 2013, A&A, 558A, 123
[2] Mart-Vidal et al. 2015, Science, 348, 311
[3] Mart-Vidal et al. 2016, A&A, 593A, 81

Curva de luz de PKS 1830-211 en rayos γ, medida con Fermi-LAT. La zona sombreada indica la ventana de tiempo de nuestras observaciones con ALMA. La línea punteada indica la época en la que, de acuerdo a nuestro modelo, la sobredensidad del plasma fue inyectada en la base del chorro.



ALMA: RESOLVIENDO LOS 'TOROS' DE LOS AGN

A lo largo de su vida las galaxias pueden experimentar fases de actividad nuclear (AGN). Para entrar en una fase activa el agujero negro supermasivo de una galaxia debe ser alimentado por material que se encuentra originalmente en el disco gaseoso de la galaxia que lo alberga, lejos de su destino final. El gas debe recorrer un largo trayecto que empieza en regiones que se hallan a distancias radiales de centenares o miles de pársecs, es decir, a distancias que son mucho mayores que las que definen el campo de influencia gravitatoria del agujero negro, cerca del horizonte de sucesos. En su viaje hacia el núcleo el gas debe perder prácticamente todo el momento angular antes de asentarse en el disco de acreción del agujero negro.



Santiago García-Burillo
Observatorio Astronómico Nacional
(OAN-IGN)
s.gburillo@oan.es

Comprender cuáles son los mecanismos que permiten transferir el momento angular del gas desde las escalas espaciales del disco hasta el disco de acreción constituye uno de los problemas mas complejos que sigue acaparando la atención tanto de observadores como de teóricos en este campo. Observaciones interferométricas del gas molecular en las regiones centrales de los AGN muestran que en una fracción significativa de galaxias activas el gas permanece atrapado en anillos circumnucleares o bien experimenta ganancia de momento angular en las regiones centrales, lo que sería indicativo de expulsión secular o `outflow' violento del gas, como muestran los resultados del survey 'Nuclei of Galaxies' (NUGA; García-Burillo et al 2005). La interpretación de esta paradoja requiere invocar la existencia de mecanismos en el potencial gravitatorio estelar que operarían en escalas espaciales $<$ 1-10pc . Alternativamente, la combinación de los torques gravitatorios con otros mecanismos como la fricción dinámica, podrían explicar el desencadenamiento del episodio de actividad.

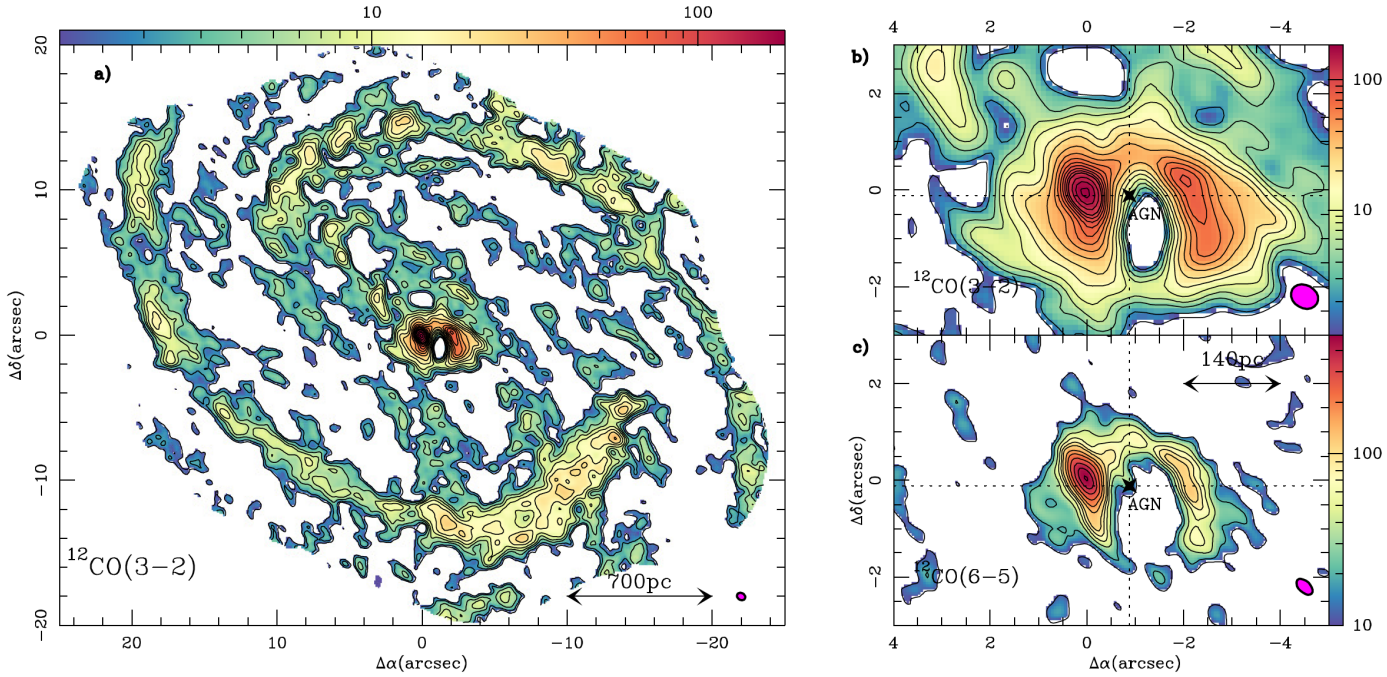
Tras superar la barrera del momento angular por cualquiera de los mecanismos antes descritos, y una vez que ha llegado al disco de acreción, el gas puede experimentar pérdida de energía y de momento angular fácilmente gracias a la fricción por viscosidad turbulenta. De este modo la última etapa de su viaje hacia el núcleo se realizaría en órbitas cuasi-espirales ya dentro del disco de acreción, a velocidades orbitales crecientes, al mismo tiempo que se emite gran cantidad de energía en forma de fotones. El gas del disco de acreción es extremadamente caliente y puede emitir gran cantidad de energía desde el ultravioleta hasta los rayos X.

Aunque el disco de acreción en torno al agujero negro supermasivo puede ser tan brillante que su luminosidad llegue a superar a la de la galaxia huésped que lo alberga, los discos de acreción de algunas galaxias activas parecen estar obscurecidos por discos toroidales de gas molecular y polvo interestelar, comúnmente denominados 'toros', que los rodearían ocultándolos en parte. Las teorías de unificación de los AGN invocan la existencia de 'toros' de tamaños entre 1 y 10 parsecs para explicar muchas de sus propiedades observacionales que surgirían como un mero efecto de

la orientación del 'toro' respecto a la dirección de observación. En particular, estas teorías explican la existencia de dos familias de objetos llamados de tipo 1 y tipo 2, dependiendo de que se detecte o no, respectivamente, emisión en líneas espectrales anchas (anchuras>1000-2000 km/s) para las transiciones permitidas correspondientes a líneas de recombinación. De esta distinción surge la división para galaxias AGN de baja luminosidad (denominadas galaxias Seyferts) entre los tipos 1 y 2. Cabe señalar que el estudio de los 'toros' en los AGN es relevante no solo para validar las teorías de unificación antes mencionadas, sino para caracterizar la naturaleza de los flujos de gas ('inflows' o/y 'outflows') que conectan el disco de acreción del agujero negro con la galaxia huésped.

Obtener una imagen directa que pruebe de manera inequívoca la existencia de los 'toros' moleculares en AGN requiere en la práctica realizar observaciones técnicamente muy exigentes con interferométros milimétricos que alcancen resoluciones angulares superiores a 0.1" para objetos que se encuentran típicamente a distancias D > 10 Mpc. Este tipo de observaciones se han podido realizar solo recientemente gracias al interferómetro ALMA. Un equipo de radioastrónomos encabezado por Santiago García-Burillo[1], del Observatorio Astronómico Nacional (OAN-IGN) ha conseguido obtener con ALMA la primera imagen del disco toroidal de gas molecular y polvo en torno al agujero negro supermasivo que se encuentra en el núcleo de la galaxia Seyfert 2 NGC1068 (García-Burillo et al., 2016). NGC1068

Figura 1: Mapas obtenidos por ALMA para las transiciones J= 3-2 (paneles a y b) y J= 6-5 (panel c) de CO en el disco de la galaxia Seyfert 2 NGC1068 durante el ciclo 0 de este instrumento. Las resoluciones espaciales fueron de ∼35 pc y ∼20 pc para las transiciones J= 3-2 y J= 6-5, respectivamente. Los paneles b y c muestran una visión ampliada del disco circumnuclear (CND) de radio ∼150 pc situado en torno al agujero negro. Figura adaptada de García-Burillo et al. (2014).



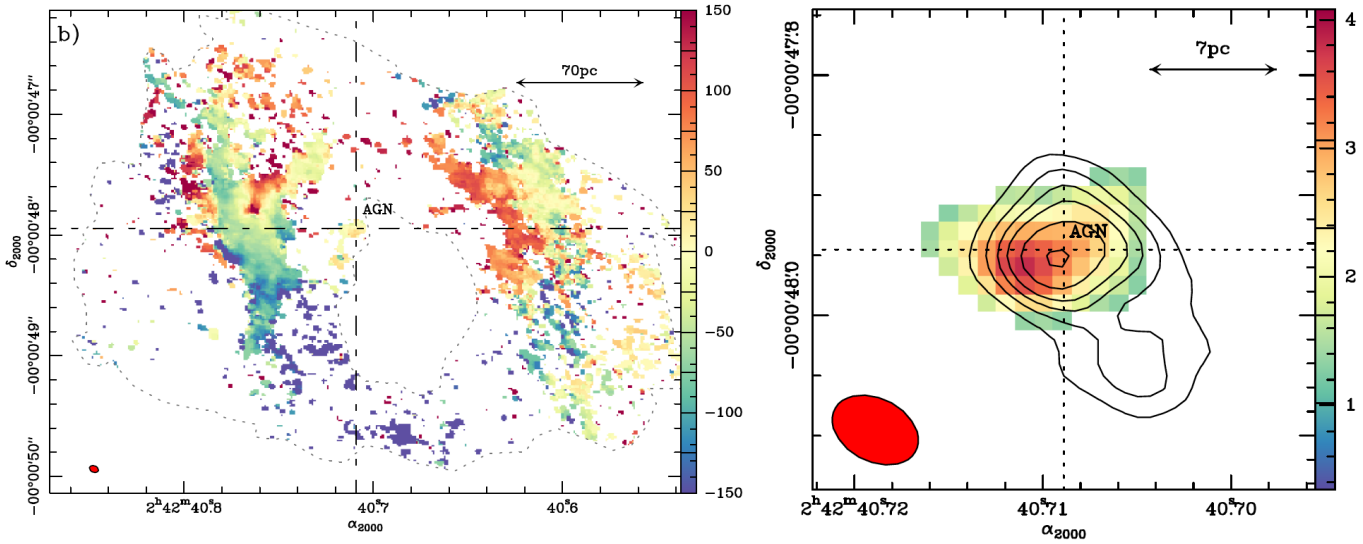


Figura 2: El nuevo mapa obtenido por ALMA para la transición J= 6-5 de CO en NGC1068 durante el ciclo 2 alcanza una resolución espacial de ∼4pc. Esto permite estudiar en detalle la cinemática del gas en el CND dominada por el 'outflow' (el panel de la izquierda muestra el mapa de las isovelocidades del gas). Por otra parte, las nuevas observaciones han sido capaces de detectar y resolver el 'toro' submilimétrico de gas y polvo, de 7-10pc de diámetro, situado en el AGN de esta galaxia Seyfert. El panel de la derecha muestra la superposicion de los contornos de la emisíon del polvo sobre la emisión de la linea de CO(6-5) (en escala de color) en el 'toro'. Figura adaptada de García-Burillo et al. (2016).

había sido hasta la fecha objeto de numerosas observaciones en el IR cercano y medio que trataron de detectar y aislar la emisión del disco de polvo en el núcleo activo de esta galaxia. Los interferómetros que operan en el IR se habían visto sin embargo limitados a la hora de obtener una imagen 'directa' del 'toro' en esta galaxia. Esta limitación se debe al escaso recubrimiento de las visibilidades en el plano de Fourier (plano u,v) que caracteriza a este tipo de instrumentos, circunstancia asociada al pequeño número de telescopios y líneas de base utilizados en ese rango de longitudes de onda. Esta limitación ha sido superada por ALMA en gran medida gracias al elevado número de antenas (>35) y líneas de base (>500) que han podido estar disponibles para las observaciones publicadas por García-Burillo et al. (2016), lo que les ha permitido obtener por primera vez una imagen 'directa' del 'toro' de gas y polvo interestelar en el rango de longitudes de onda submilimétricas.

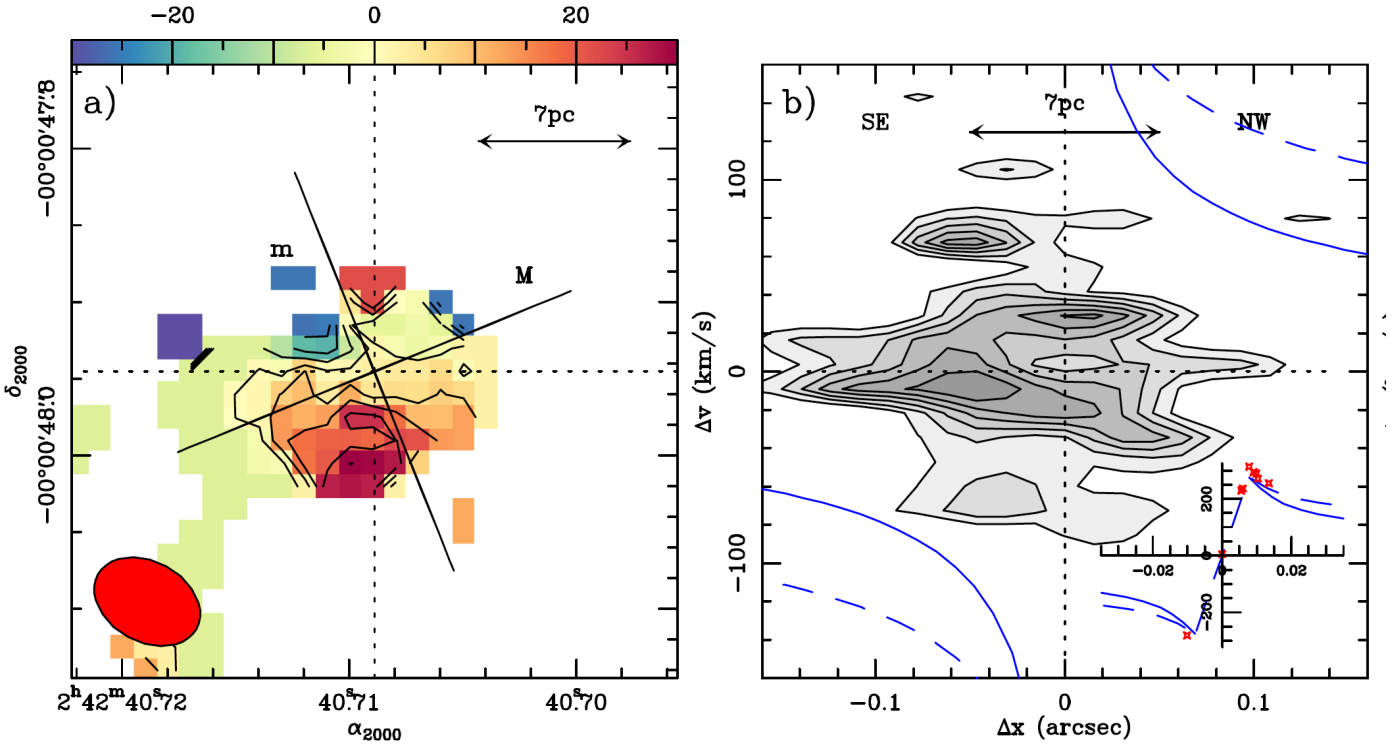
Santiago García-Burillo y su equipo observaron por primera vez la galaxia NGC1068 durante el ciclo 0 de ALMA. Estas observaciones, publicadas en García-Burillo et al. (2014), obtuvieron una imagen detallada del anillo molecular 'starburst', de radio r∼1-1.5 kpc, así como del disco circumnuclear (CND), de radio r ∼ 150 pc, que rodea al agujero negro (ver Figura 1). Los primeros mapas, obtenidos en varias transiciones de las moléculas CO, HCN, HCO+ y CS, que tenían resoluciones espaciales que iban de 20 a 35 pc, fueron determinantes para detectar la presencia de un 'outflow' molecular masivo (Mgas ∼ 1e07 Msun).

El 'outflow' de gas, que se extiende en el disco hasta un radio de ∼ 500 pc, constituye un testimonio flagrante del efecto de la retroalimentación de la actividad (conocido como AGN 'feedback') sobre la cinemática del gas en el disco de esta galaxia. La

búsqueda y caracterización del fenómeno 'feedback' en AGN tanto del Universo local como del Universo mas lejano se ha convertido en uno de los nichos científicos en los que ALMA ha realizado y continuará realizando en el futuro contribuciones relevantes.

Las primeras observaciones del ciclo 0, que también detectaron la emisión del contínuo del polvo en el anillo 'starburst' y en el CND, no alcanzaron la resolución espacial suficiente para aislar la emisión del 'toro' molecular en esta galaxia, sin embargo. Las observaciones posteriores obtenidas recientemente durante el ciclo 2 de ALMA por el mismo equipo, encabezado por Santiago García-Burillo, alcanzaron resoluciones espaciales de 0.06“, equivalentes a ∼4 pc a la distancia de NGC1068 (D=14 Mpc), lo que supone un significativo factor 20 de mejora en el tamaño (área) del beam respecto a las observaciones precedentes (ver Figura 2). Las nuevas imágenes trazan la emisión del gas molecular en la transición rotacional J=6-5 de la molécula CO, sensible al gas molecular denso (n(H2)∼1e05 mol cm-3), así como la emisión térmica en el contínuo del polvo en el 'toro'. Para ello se realizaron observaciones en la muy exigente y competitiva banda 9 de ALMA, en un rango de frecuencias en torno a 689 GHz (i.e., en longitudes de onda en torno a ∼ 430 micras).

Figura 3: El panel de la izquierda (a) muestra el mapa de las isovelocidades del gas en el 'toro' de NGC1068. La cinemática del gas molecular en el 'toro' muestra velocidades de rotación mas lentas de lo esperado, perturbadas además por movimientos no circulares. El panel de la derecha (b) muestra el diagrama posición-velocidad extraído a lo largo del eje mayor del 'toro' (M en panel a). Las velocidades del gas en el 'toro' se comparan con la extrapolación de dos modelos para la curva de rotación que ajustan la cinemática del disco interno de máseres (curvas en azul en panel b). Figura adaptada de García-Burillo et al. (2016).



Los nuevos mapas obtenidos por ALMA han sido capaces de detectar y resolver el 'toro' submilimétrico de gas y polvo de esta galaxia Seyfert con un detalle sin precedentes. La detección del 'toro' en la línea J=6-5 de CO y en la emisión térmica del polvo, permitió comparar los tamaños de ambas estructuras, resultando ser comparables: el diámetro (deconvolucionado) del 'toro' submilimétrico es ∼ 7-10 pc. El 'toro' de gas molecular es 7 a 10 veces más grande que el disco de mega-máseres de H2O, de tamaño ∼1 pc, detectado por Greenhill et al (1996) y Gallimore et al (2001). La masa de gas molecular del 'toro' derivada por García-Burillo et al. (2016) es de ∼1e05 Msun. Tanto la masa del 'toro' como su tamaño tamaño son ajustados satisfactoriamente por los modelos de 'toros grumosos' ('CLUMPY'; Nenkova et al 2008) adaptados a esta fuente, y que dan cuenta de las observaciones en el IR cercano y medio, así como en el rango submilimétrico cubierto por primera vez por ALMA.

Además del estudio del tamaño y la masa del 'toro' submilimétrico, la detección de la línea espectral de CO permitió caracterizar los rasgos principales de la cinemática del gas molecular en el 'toro'. Aunque la previsión era encontrar un disco dinámicamente relajado y soportado por rotación regular simple, la cinemática del gas en el 'toro' es sorprendentemente compleja y perturbada. Como se muestra en la Figura 3, aunque la presencia de máseres de H2O implica que el disco molecular a r ∼ 1pc debe tener necesariamente una inclinación próxima a 90 grados (disco 'edge-on'), el 'toro' submilimétrico detectado por ALMA, que representaría la corona externa rodeando al disco de máseres, parece estar significativamente menos inclinado que aquél. En el artículo se estima que el alabeo del disco molecular externo requiere inclinaciones ∼ 30-60 grados.

Otro resultado clave de estas observaciones, que subraya la complejidad del 'toro' en NGC1068, indica que la cinemática del gas parece estar perturbada por fuertes movimientos no-circulares que se superpondrían a la rotación del gas en el disco toroidal. García-Burillo et al. (2016) discute varios escenarios que darían cuenta de esta cinemática

Panorámica del interferómetro ALMA sobre el llano de Chajnantor con la Vía Láctea al fondo. Crédito: ESO/B. Tafreshi (twanight.org)

tan compleja. El 'toro' podría presentar inestabilidades asimétricas inducidas por evolución secular interna o bien excitadas por agentes externos (e.g., por acreción de gas). Estas inestabilidades fueron teóricamente descritas por primera vez en la literatura científica por Papaloizou & Pringle en el año 1989, y estas observaciones serían la primera prueba clara de que los 'toros' en los AGN son muy sensibles a este tipo de inestabilidades. Alternativamente los movimientos no circulares detectados podrían explicarse como debidos a la componente de la base del 'outflow' molecular detectado a gran escala en observaciones anteriores (García-Burillo et al. 2014)

Nuevas observaciones de ALMA ya en marcha (ciclo 4) nos permitirán alcanzar resoluciones espaciales de 1-2 pc y resolver posiblemente el enigma del 'toro' perturbado de NGC1068. Resta además por descubrir si el paradigma del 'toro' de NGC1068 es o no extensible a otros AGN cercanos que son susceptibles de ser observados por ALMA con un detalle comparable al de las imágenes antes descritas.

NOTA

[1] El equipo incluye un número significativo de co-Is españoles: Cristina Ramos Almeida (IAC), A. Usero y A. Fuente (OAN), L. Colina, A. Alonso-Herrero y A. Labiano (CAB-CSIC), e I. Márquez (IAA-CSIC).

REFERENCIAS

Gallimore et al. 2001, ApJ, 556, 694.
Garcia-Burillo et al. 2005, A&A, 441, 1011.
García-Burillo et al. 2014, A&A, 567, A125.
García-Burillo et al. 2016, ApJL, 823 L12.
Greenhill et al 1996, ApJL, 472, L21.
Nenkova et al 2008, ApJ, 685, 147.
Papaloizou & Pringle 1989, MNRAS, 208, 721.

RUGOSIDADES EN LA "PIEL" DE ORIÓN

ALMA es una poderosa herramienta para obtener imágenes y estudiar la cinemática del gas molecular en regiones de formación estelar. En este artículo mostramos las primeras imágenes espectrales de alta resolución angular y espectral de la Barra de Orión, el interfase entre la región HII alrededor de las icónicas estrellas del Trapecio y la nube molecular de Orión, la región de formación de estrellas masivas más cercana al Sistema Solar. Estas imágenes permiten obtener una visión sin precedentes de la morfología y actividad en el borde de una nube intensamente irradiada por fotones ultravioleta (UV). Gracias a ellas, podemos comprender mejor la interacción entre la radiación UV procedente de estrellas masivas jóvenes y el reservorio interestelar de la región.

Javier R. Goicoechea
Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC)
jr.goicoechea@icmm.csic.es

Los fotones en el ultravioleta "lejano" (UVL; $6 < E < 13.6$ eV) emitidos por estrellas masivas O y B regulan, o al menos influyen notablemente, en la dinámica, calentamiento y química del medio interestelar neutro (hidrógeno atómico no ionizado). Desde un punto de vista global, los procesos físicoquímicos que tienen lugar en entornos iluminados por radiación UVL son consecuencia de los efectos radiativos que producen las estrellas masivas en el medio interestelar. Estos efectos se producen en diferentes escalas: en regiones de formación estelar de la Vía Láctea, en galaxias con brotes de formación estelar, y también en el Universo primitivo: véase la detección de la línea de estructura fina del carbono ionizado ([CII]158μm, el más eficiente refrigerador del gas interestelar) en galaxias a alto redshift con ALMA.

Desde una perspectiva más detallada, el estudio de la interacción entre la radiación UVL y la materia bariónica interestelar (átomos, moléculas y polvo) contribuye a una mejor comprensión de multitud de entornos y objetos en la galaxia: nubes difusas, el interfase entre regiones HII y nubes moleculares densas, las nebulosas planetarias alrededor de estrellas evolucionadas o los discos protoplanetarios en la vecindad de estrellas masivas (los proplyds). A estos entornos en los que las propiedades del gas y polvo están determinadas por la presencia de fotones UVL se les conoce genéricamente como regiones de fotodisociación ("PDR" en el argot, del inglés photodissociation regions). Estos fotones estelares, con longitudes de onda entre ≈912 y 2000 Å, no disponen de una energía suficiente para ionizar el hidrógeno atómico (como ocurre en regiones HII) pero si fotodisocian (rompen) moléculas e ionizan átomos con potenciales de ionización menores que 13.6 eV (carbono, azufre, hierro, silicio…). Las PDRs son, por tanto, predominantemente "neutras" (la fracción de ionización máxima es $[e^-]/[H] \approx 10^{-4}$ cuando casi todos los electrones provienen de la ionización de átomos de carbono). En ellas tiene lugar la transición entre el gas atómico y el gas molecular ($H \rightarrow H_2$, $C^+ \rightarrow C \rightarrow CO$, véase la Figura 1), a medida que la densidad de columna de gas y polvo (la extinción; $N_H \approx 1.9 \cdot 10^{21} A_V$ cm^{-2}) aumentan hacia el interior de la nube y el flujo de fotones UVL se atenúa. Algunas de las características observacionales más comunes de una PDR son la emisión en bandas en el infrarrojo medio de hidrocarburos

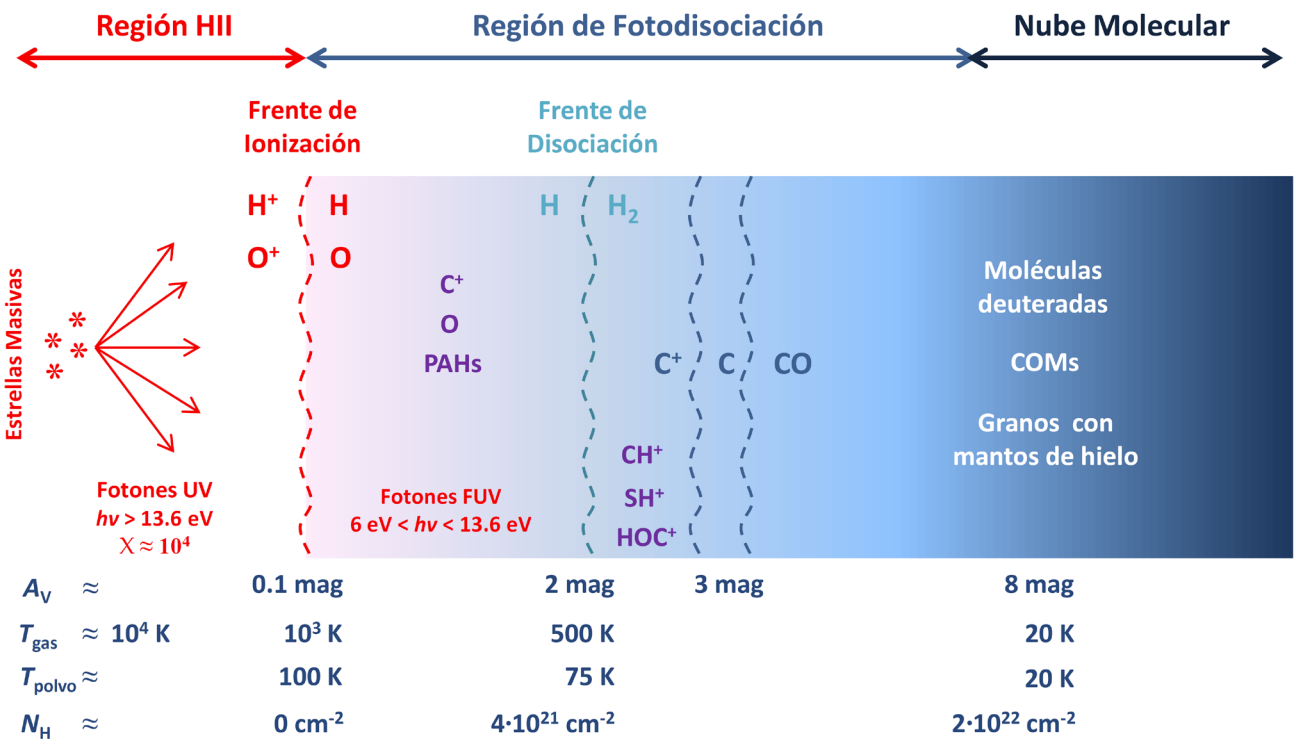


Figura 1. Estructura simplificada del borde de una nube molecular fuertemente irradiada por un campo de radiación UV.

policíclicos aromáticos (PAHs), la emisión en la líneas de estructura fina del carbono ionizado [CII]158μm y del oxígeno neutro [OI]63μm, la emisión del polvo en el infrarrojo lejano (después de absorber fotones UVL, los granos se calienten y reemiten en el infrarrojo), así como la presencia de iones moleculares que no se observan en otros entornos y que reflejan la fotoquímica subyacente de un gas irradiado (CH^+, SH^+, CO^+, HOC^+, CF^+, C_3H^+, etc.).

El estudio observacional y teórico de PDRs comenzó hace más de 3 décadas en un afán por caracterizar las nubes moleculares cercanas a estrellas masivas (Orión, el Centro Galáctico, etc.). De forma genérica, las PDRs (cualquier entorno en el que la radiación UVL determina las propiedades del medio) representan una elevada fracción del gas neutro interestelar de cualquier galaxia. Quizás hasta un 90%, básicamente todo el gas y polvo entre $A_V \approx 0.1$ y 7 mag, punto a partir de cual el campo UVL estelar es casi despreciable (véase Hollenbach & Tielens 1999). Además de servir como diagnósticos de las propiedades físicas del gas (densidad, temperatura, campo de radiación, etc.), la emisión procedente de PDRs ([CII] 158µm, PAHs, polvo caliente, etc.) puede utilizarse para estimar la tasa de formación estelar y para investigar la retroalimentación entre estrellas masivas y sus nubes progenitoras. Comprender en detalle efectos como la fotoevaporación de una nube molecular también nos ayuda a determinar su vida media y a entender los mecanismos que limitan la formación de nuevas estrellas. Al contrario, también se piensa que los efectos dinámicos provocados por un intenso campo de radiación UVL (p.ej. la compresión del gas, véase más abajo) podrían inducir a la formación de una nueva generación de estrellas menos masivas.

En estos últimos 30 años se han podido caracterizar una gran multitud de microprocesos físicoquímicos que tienen lugar en PDRs, desde la formación de moléculas de hidrógeno en granos de polvo, al calentamiento del gas por colisiones con electrones fotoeyectados de granos y PAHs (este efecto fotoeléctrico es el mecanismo de calentamiento dominante).

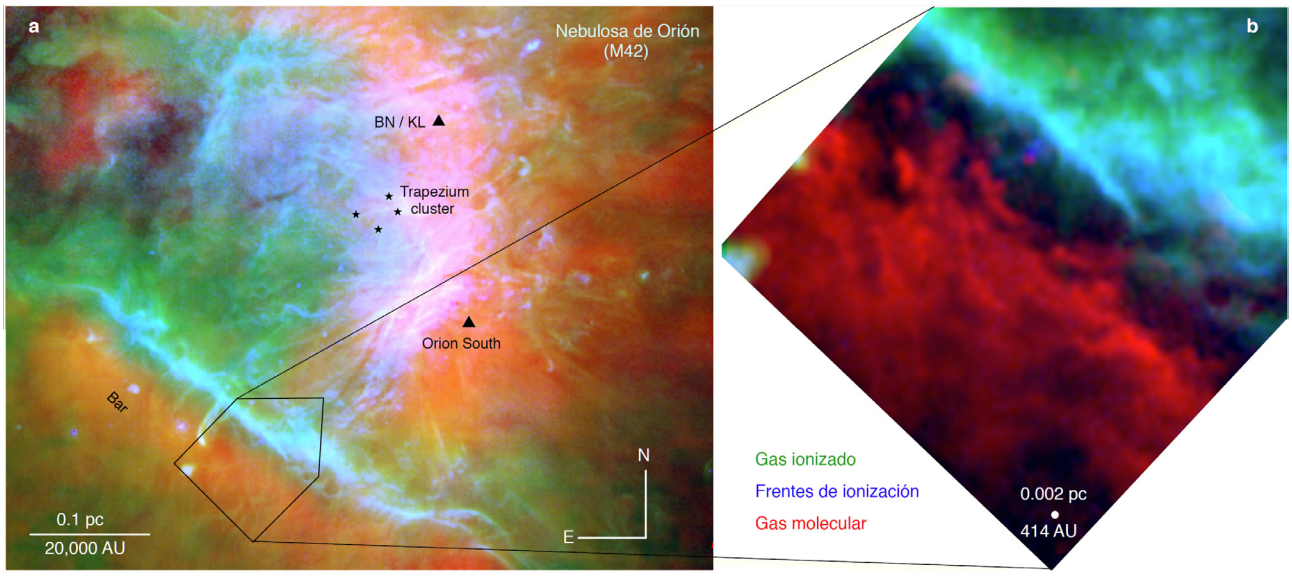


Figura 2. Imagen "multicolor" de la nebulosa y nube molecular de Orión. En rojo se muestra la emisión del gas molecular (cartografiada con el radiotelescopio de 30 m de IRAM), en verde el gas atómico (ionizado por la radiación ultravioleta procedente de las estrellas del Trapecio), y en azul el interfase entre el gas ionizado y el gas neutro (con VLT/MUSE). El zoom muestra la región observada de la Barra de Orión con ALMA con una resolución de ≈1'' (≈414 AU).

Los modelos numéricos de PDRs incluyen un tratamiento muy detallado de la propagación y dispersión de fotones UVL, de la termodinámica (balance entre calentamiento y enfriamiento), así como de la formación de moléculas en fase gaseosa y en la superficie de los granos (auténticos catalizadores de multitud de reacciones químicas que de otra forma no serían eficientes). Sin embargo, la mayoría de estos modelos, muy detallados desde el punto de vista de los procesos microscópicos, proporcionan una visión estática (en equilibrio) de estas regiones. Otros aspectos como la respuesta cinemática y la morfología a pequeñas escalas espaciales del material irradiado han sido mucho menos estudiados. Es decir, se ha progresado más lentamente en nuestra comprensión de la dinámica de las PDRs: inestabilidades producidas por la propagación del frente de ionización (transición H^+/H) y del frente de disociación (transición H/H_2), su evolución química en función del tiempo, su cinemática: flujo de material que fotoevapora de la superficie externa de la nube, ondas de compresión hacia el interior de la nube, así como los posibles efectos del campo magnético y de la turbulencia.

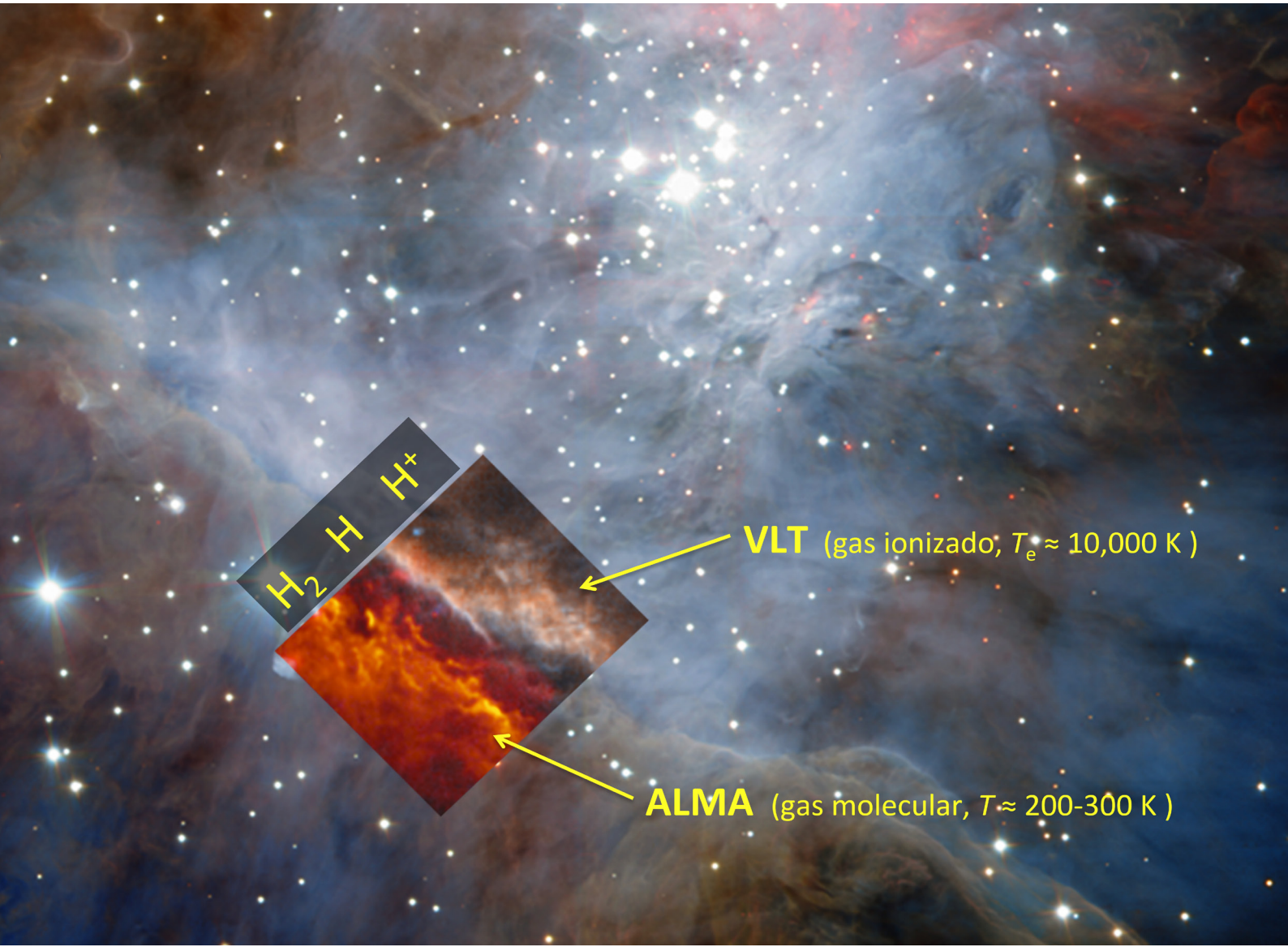
Por otro lado, el estado del arte de los modelos magneto-hidrodinámicos (MHD) del medio interestelar ha ido aumentado considerablemente la resolución espacial y temporal de las simulaciones, eso sí, a expensas de una descripción detallada de la química, termodinámica y de la transferencia de radiación. Hoy en día, estos desarrollos teóricos paralelos (modelos PDR termo-químicos y modelos MHD multidimensionales) empiezan a interaccionar, de ahí la necesidad imperiosa de obtener imágenes de alta sensibilidad y rango dinámico del medio interestelar con gran resolución angular y espectral. Las observaciones en el infrarrojo (con telescopios tipo GTC, VLT y pronto con JWST) proporcionan suficiente resolución angular (por debajo del segundo de arco, Figura 2) para resolver la transición $H^+/H/H_2$ (la separación región HII/nube molecular) y para detectar la emisión del polvo y de PAHs, pero no permiten acceder a la emisión del gas molecular (CO, HCN, HCO^+, …), ni proporcionan la resolución espectral (< 1 km/s) necesaria para estudiar la cinemática del gas. En el rango crítico para el estudio y caracterización del Universo molecular, el rango (sub)milimétrico, solo la síntesis

de apertura (obtención de mosaicos mediante técnicas interferométricas) puede proporcionar este tipo de imágenes espectrales.

LA BARRA, EL BORDE ILUMINADO DE LA "PIEL" DE ORIÓN

Nuestro grupo ha liderado la obtención de los primeros mosaicos de la nebulosa de Orión realizados con ALMA (publicados en Nature, Figura 2). En ellos se han obtenido imágenes espectrales de alta resolución del borde de la nube molecular de Orión, la región de formación de estrellas masivas más cercana al Sistema Solar (a unos 400 pc, otras regiones similares están a varios kpc de distancia). Observando Orión se puede estudiar con gran detalle el proceso de nacimiento y evolución de estrellas masivas, que, en el caso del cúmulo del Trapecio (en el centro de la nebulosa), llegan a ser hasta 30 veces más masivas y 200 000 veces más luminosas que nuestro Sol. El objetivo del estudio es comprender la morfología y actividad que tiene lugar en la zona como resultado de la interacción entre la radiación emitida por estrellas masivas jóvenes y la nube molecular parental. La Barra de Orión es el interfase con la región HII que rodea al cúmulo del Trapecio (a solo 0.25 pc de distancia, Figura 3). En el borde de la Barra ($A_V \approx 0.1$ mag), el campo de radiación UVL es unas 10 000 veces más intenso que en una nube interestelar difusa típica de la vecindad solar. Debido

Figura 3. Nebulosa de gas ionizado en Orión alrededor del cúmulo del Trapecio captada con el VLT y un detalle del gas molecular en la Barra observado con ALMA.



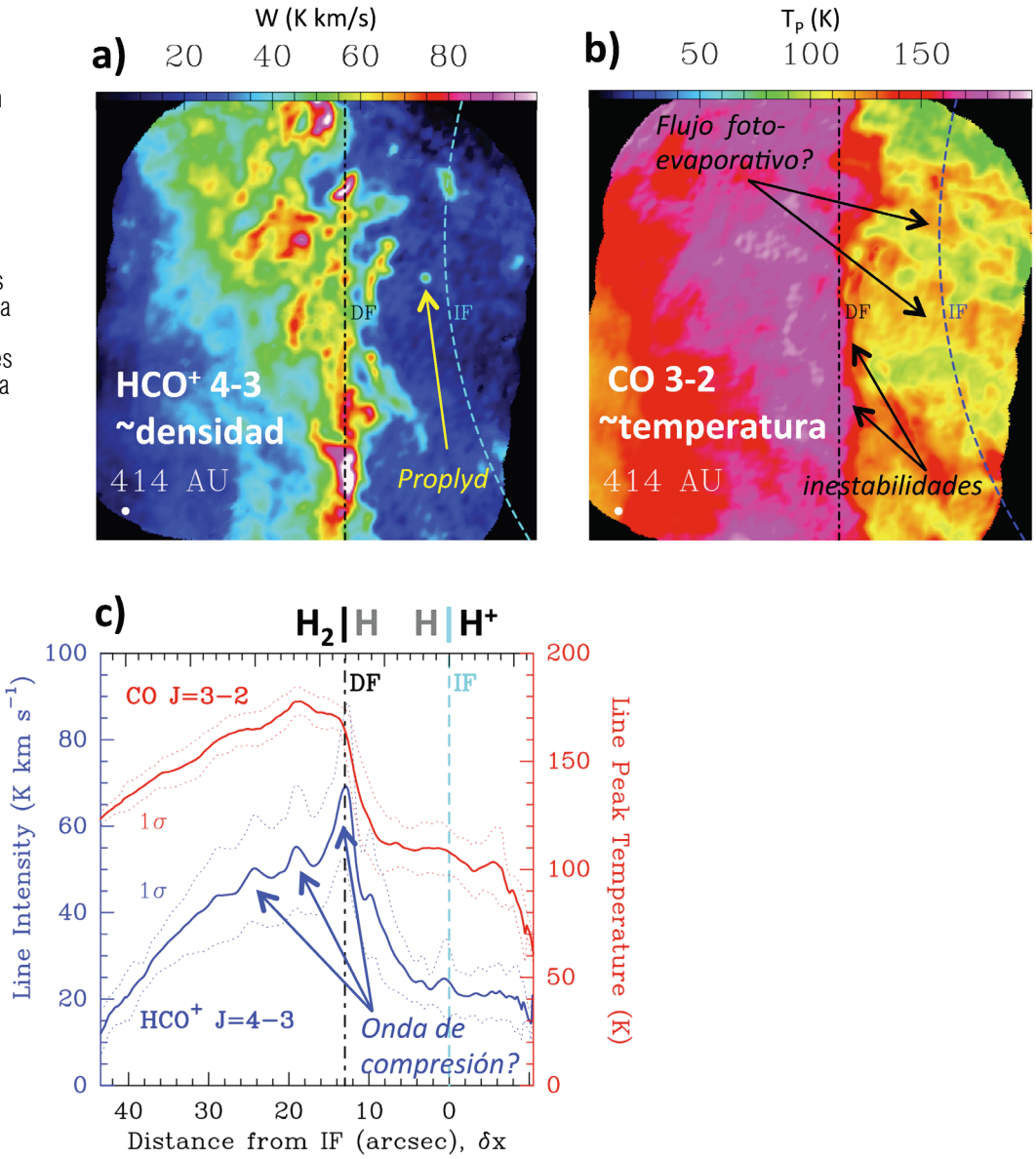


Figura 4. Imágenes con ALMA de un pequeño campo en la Barra de Orión (50''x50'') en dos trazadores del gas molecular. a) HCO^+ J=4-3. b) CO J=3-2. c) Promedios verticales de la intensidad de línea perpendiculares a la Barra. El flujo de fotones UVL decrece de derecha a izquierda en estas imágenes rotadas.

a su cercanía y ventajosa geometría en el plano del cielo ("de canto"), la Barra de Orión es un objeto ideal para comprender la estructura de este tipo de interfases y su morfología a muy pequeñas escalas (unas centenas de unidades astronómicas en estos primeros mosaicos con ALMA).

Nuestras observaciones se realizaron desde Chile apuntando simultáneamente 30 antenas de 12 m de diámetro (en la actualidad se utiliza un número más elevado de antenas) hacia 27 posiciones diferentes de la Barra, de ahí el término mosaico. Hoy se pueden realizar mosaicos de hasta 150 apuntados diferentes. Puesto que un interferómetro no es sensible (la emisión se "filtra") a la emisión más extensa que la resolución de una antena única (el "haz primario", unos 20 arcsec en nuestro caso) a este conjunto de observaciones interferométricas hubo que añadirle la emisión extensa de la región cartografiada con la antena de 30 m de IRAM en Pico Veleta (los llamados zero- y short-spacings). El campo de visión resultante de las imágenes combinadas ALMA+IRAM 30-m es de unos 50''x50'', con una resolución angular algo menor que 1'' y una resolución en velocidades de 0.4 km s^{-1}

(R≈750 000); unos 10 000 espectros por molécula detectada. Las observaciones se realizaron a 350 GHz y buscábamos la detección simultánea de transiciones rotacionales de CO (sensible a la temperatura del gas), HCO^+ (sensible a la densidad del gas) e iones reactivos como SH^+ o HOC^+, moléculas un tanto exóticas y con vidas medias de unas pocas horas, pero inmejorables trazadores de las primeras reacciones químicas que se dan en una nube interestelar.

SORPRENDENTES IMÁGENES

Los primeros mosaicos con ALMA son ciertamente impresionantes y demuestran la capacidad del interferómetro para obtener imágenes espectrales de la emisión interestelar resolviendo la morfología y cinemática del gas a muy pequeñas escalas espaciales. Las imágenes revelan que, a escalas de unos cientos de unidades astronómicas, el borde de la nube molecular está fragmentado y formado por pequeñas estructuras filamentosas y diminutos glóbulos (≈1000 AU) de alta densidad (Figura 4a). Justo en el extremo irradiado de la nube, se detectan rugosidades con patrones periódicos (inestabilidades), así como evidencias de un flujo de gas que se fotoevapora de la nube (Figura 4b). El intenso campo de radiación UVL, y en menor medida los vientos, procedentes de las estrellas del Trapecio provocan que las capas más externas de la nube molecular se compriman y aumenten su densidad, hasta unas 10^6 moléculas cm^{-3}, dando lugar a esos filamentos y grumos. Por primera vez, las observaciones parecen mostrar la onda de alta presión ($P/k \approx 10^8$ K cm^{-3}, Figura 4c) que se propaga, comprimiendo el gas, desde el borde irradiado de la nube hacia el interior de la misma. Queda demostrado que los efectos dinámicos son más importantes de lo que se pensaba. Sorprendentemente, las imágenes muestran que las zonas de transición H/H_2 y $C^+/C/CO$ están mucho más cercanas entre sí que las predicciones de los modelos PDR estacionarios que han estado vigentes en los últimos años.

En el contexto de los mecanismos capaces de inducir la formación de estrellas, nos preguntamos si estos grumos y filamentos densos formados por la compresión del borde irradiado de la nube podrían ser las "semillas" para la formación de una nueva generación de estrellas. La masa de los grumos detectados con ALMA y su distribución en densidades no son suficientes para que la gravedad impulse su colapso. Pero ¿podrían estos grumos "unirse" en el futuro y dar lugar a condensaciones más masivas e inestables gravitacionalmente? Inesperadamente, las imágenes muestran la presencia de un proplyd (una joven estrella de baja masa rodeada por un disco protoplanetario) embebido entre los frentes de ionización y de disociación de la Barra, como si hubiera emergido recientemente de la nube después de haber sido "barrido" por el frente de disociación. Nuevas observaciones y modelos ayudarán a entender si estos mecanismos que ocurren en la "piel" de Orión podrían ser, en definitiva, un mecanismo inductor de formación estelar. Es muy notable que incluso en estas primeras imágenes, con el interferómetro aún en desarrollo, ALMA nos proporciona ya una visión tan diferente de una región de formación de estrellas masivas tan estudiada como Orión, así como de los efectos radiativos de las estrellas masivas jóvenes en el medio interestelar circundante.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Jérôme Pety (IRAM) y a Sara Cuadrado (estudiante de doctorado en el ICMM-CSIC) su esfuerzo y contribución en la obtención e interpretación de las imágenes que se presentan en este artículo.

OBSERVACIONES DE NEBULOSAS PLANETARIAS

Las estrellas de tipo solar (casi todas las que podemos ver en el cielo, con masas iniciales de entre 0.5 y 8 masas solares, incluyendo nuestro sol) evolucionan dejando la secuencia principal para formar gigantes rojas o similares. La fase de gigante roja extrema se suele llamar Asymptotic Giant Branch, AGB. Las estrellas AGB son por tanto estrellas de gran tamaño (varias AUs) y luminosidad (hasta $10^4 L_o$), pero frías (menos de 3000 K). Nuestro sol será una de estas estrellas en un futuro.

Valentín Bujarrabal
Observatorio Astronómico Nacional (OAN-IGN)
v.bujarrabal@oan.es

Otra característica importante de las gigantes rojas es que pulsan fuertemente. Debido a la alta luminosidad, gran radio y masa moderada (y por tanto baja gravedad pero alta presión de radiación en superficie), y potenciado por la propia pulsación, que tiende a mantener capas atmosféricas a gran distancia de la fotosfera, las estrellas AGB pierden masa copiosamente, formando un espesa envoltura circunestelar (CSE). Esta pérdida de masa tiende a aumentar con el tiempo, llegando hasta 10^{-3} M_o yr^{-1} al final de la fase. Entonces la estrella eyecta la mayor parte de su masa en un tiempo breve, unos mil años, y se produce una fuerte evolución. La estrella literalmente se ha eyectado a sí misma y se ha transformado en una nebulosa, que adopta a menudo formas espectaculares. En su centro queda un pequeño remanente estelar, el núcleo de la AGB, que es muy caliente y compacto, o sea, que es una enana azul o blanca (WD). Se cree que es así como se forman las nebulosas planetarias (PNe) y (la mayor parte de) las enanas blancas.

No sólo la estrella cambia mucho en estas fases, las capas circunestelares también lo hacen. Las CSEs alrededor de AGBs son básicamente esféricas y se expanden isótropamente a velocidad moderada (entre 10 y 20 km s^{-1}), mientras que las PNe suelen presentar una marcada simetría axial y flujos bipolares con velocidades que a menudo exceden 100 km s^{-1}. Se observan, sobre todo en las nebulosas más famosas, masas de gas y polvo de 0.1 – 0.5 M_o escapando a 50 – 100 km s^{-1}. (Como es habitual en astronomía, las nebulosas más populares suelen ser las más masivas y brillantes, pero también hay nebulosas con menos masa total, < 0.1 M_o, velocidades moderadas y aparentemente esféricas; parecen pocas, pero hacer una comparación estadística es difícil pues son las menos luminosas a todas las longitudes de onda.) La evolución de AGB+CSE a WD+PN es muy rápida, $\sim$ 1000 – 2000 años. No se sabe bien como se produce el gran cambio de la componente nebular, el mecanismo más aceptado supone la presencia de chorros post-AGB muy rápidos debidos a un proceso magnetocentrífugo parecido al que actúa en núcleos de galaxias activas y estrellas jóvenes que acretan masa. En nuestro caso, este proceso necesita la presencia de una binaria en el centro, que proporcione el momento angular necesario para que se establezca rotación y se generen discos de acrecimiento.

CON ALMA: GAS EN EXPANSIÓN Y EN ROTACIÓN

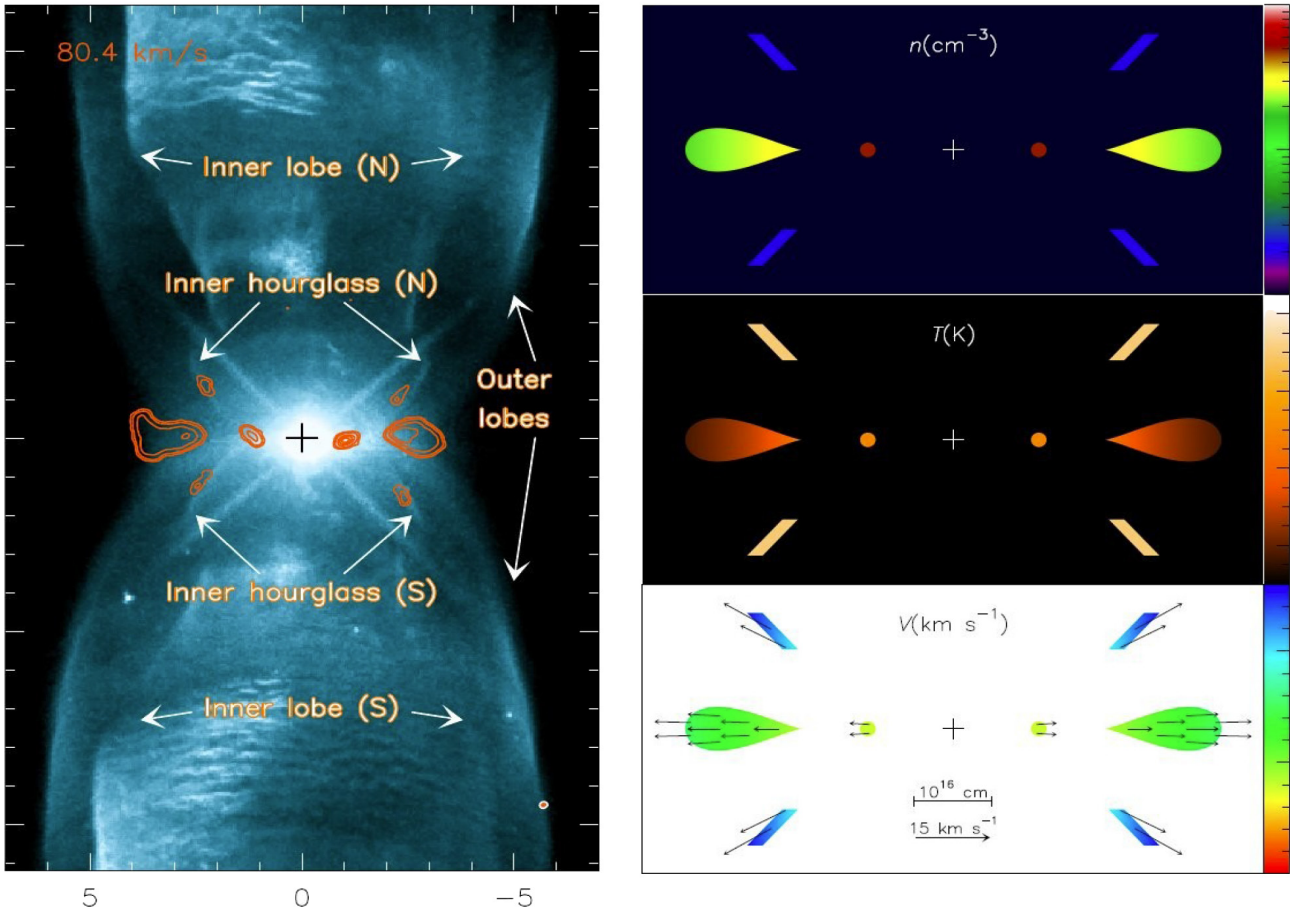


Figura 1: Izda. Emisión de CO J=3-2 en M2-9 a la velocidad sistémica. Se aprecian dos anillos ecuatoriales en expansión lenta y la base de los lóbulos brillantes, aún rica en moléculas. Dcha: modelo de nebulosa que explica los datos de ALMA en M2-9, se indican los principales parámetros físicos y la dinámica. El modelo supone simetría axial. Esta es una de las pocas pPNe en las que la región molecular contiene sólo una parte menor de la masa total (la componente dominante es una PDR de gas parcialmente ionizado).

ALMA ha mostrado gran eficacia para la observación de las nebulosas que rodean estrellas evolucionadas, particularmente de las nebulosas planetarias jóvenes o nebulosas preplanetarias (pPNe, intermedias entre CSEs AGB y PNe). La razón es la eficacia de ALMA para observar líneas espectrales en gas molecular de moderada excitación, que es dominante en pPNe. Por el contrario, en las nebulosas más viejas el gas está fotodisociado y en general más excitado, debido a la radiación de la estrella central, cada vez más caliente, y a la progresiva dilución de la nebulosa en su expansión. Por otro lado, la fase de pPN es muy interesante pues nos permite estudiar el espectacular pero mal entendido proceso con que termina la AGB y se forman las PNe.

OBSERVACIONES CON ALMA DE NEBULOSAS PLANETARIAS Y PREPLANETARIAS

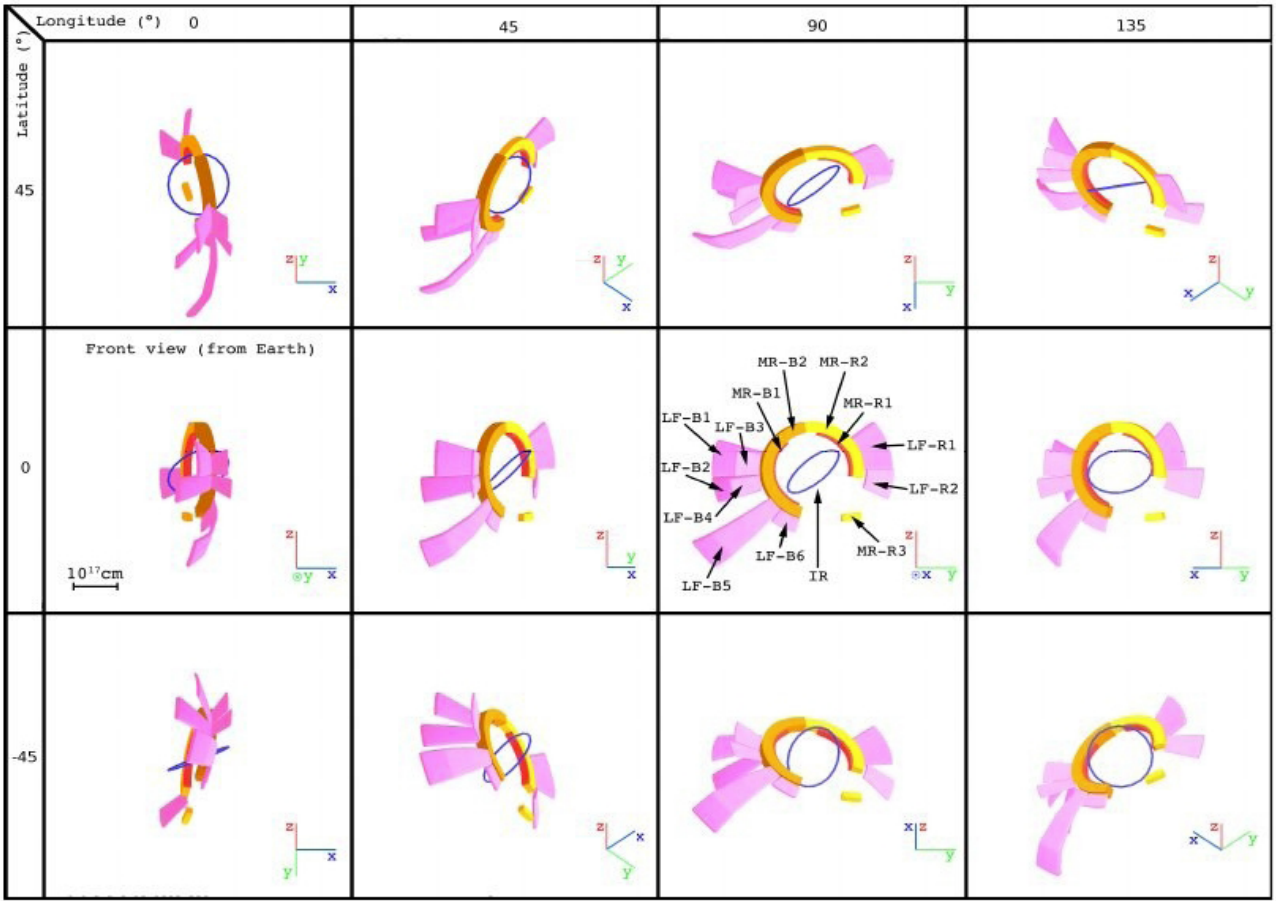
ALMA ha permitido observar con gran resolución angular y sensibilidad diferentes componentes de gas en expansión en pPNe. Recordemos que, en principio, las CSEs AGB y las PNe, están siempre en expansión, pues se trata de gas eyectado por una estrella, y de hecho así se observa en casi todos los casos. La mayor parte de las observaciones de pPNe y PNe con ALMA publicadas hasta ahora están firmadas por astrónomos españoles. Se han estudiado nebulosas con muy masivos y rápidos flujos bipolares, como OH 231.8+4.2 (Sánchez Contreras et al. 2017, en preparación), en cuyas componentes más internas se han identificado diferentes fases de

eyección bipolar de material. En otro objeto, M 2-9, se ha detectado gas en expansión lenta con poca masa (Castro-Carrizo et al. 2017). Esta nebulosa presenta un imagen óptica bipolar muy extendida y llamativa, pero el gas rico en moléculas sólo se sitúa en regiones próximas al ecuador que se expanden lentamente (3 – 10 km s^{-1}) y parecen apantalladas a la radiación UV de la estrella central.

Se aprecian dos anillos ecuatoriales, con una estructura y dinámica que revela que fueron eyectados desde un sistema binario (cuyas propiedades pudieron ser indirectamente estudiadas), y una pequeña región interior de la extensa estructura óptica. Ver la Fig. 1, donde se aprecia el potencial de este tipo de observaciones para el estudio de las nebulosas que rodean estrellas evolucionadas.

Otro objeto estudiado con ALMA es la PN joven NGC 6302 (Santander-García et al. 2016). Se trata de una nebulosa más evolucionada en cuyo centro hay una estrella enana extraordinariamente caliente, con más de 2 10^5 K. A pesar de ello, hay una región ecuatorial que permanece en estado molecular debido a la alta masa concentrada en ella. Las observaciones de ALMA permitieron estudiar en detalle la forma de estas regiones, gracias al uso del potente software libre de análisis SHAPEMOL, detectando en

Figura 2: Modelo que describe las observaciones con ALMA de la emisión de CO J=3-2 en NGC 6302. Se muestran vistas desde diferente ángulos, la longitud 90 grados muestra la vista desde uno de los polos. Obsérvese el complejo modelo en 3-D que permite definir SHAPEMOL y que es necesario para describir la detallada observación obtenida con ALMA. El anillo que se muestra amarillo es ecuatorial, pero el eje del pequeño anillo azul es muy diferente del de la extensa nebulosa visible en el óptico.



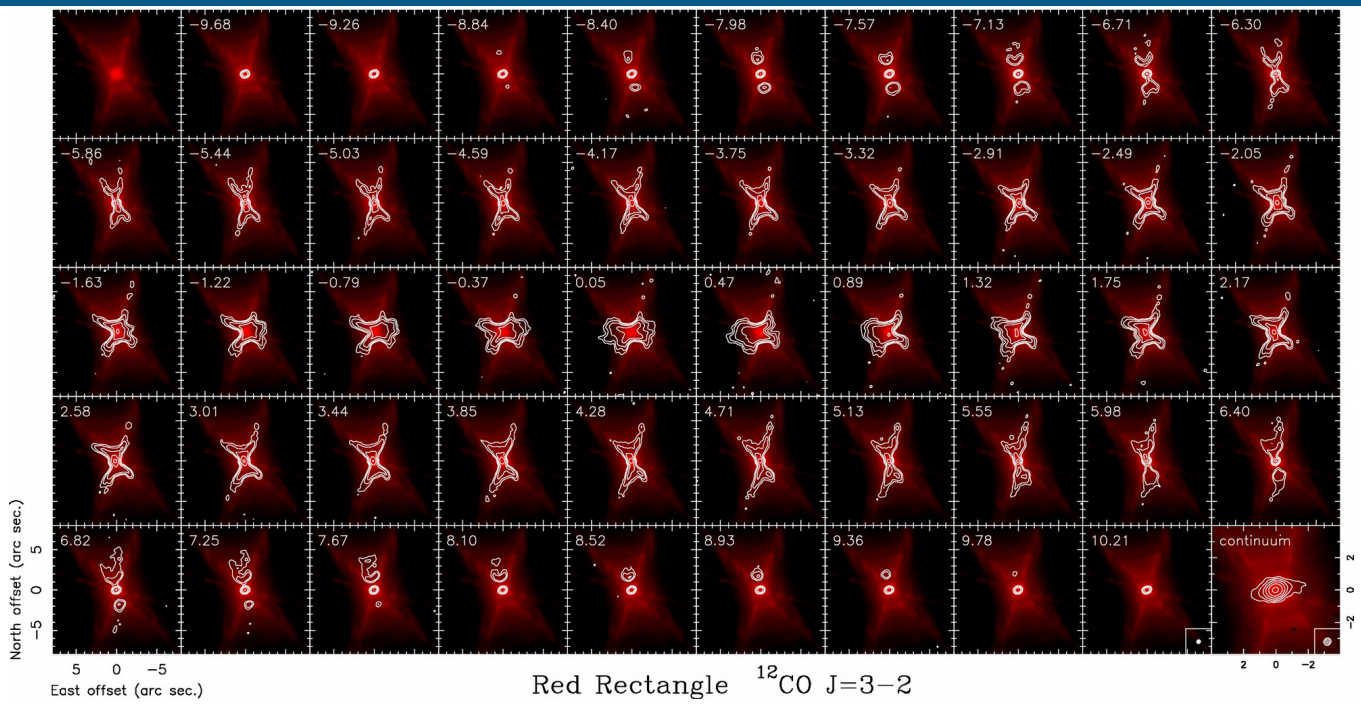


Figura 3: Mapas del Rectángulo Rojo con ALMA en CO J=3-2, superpuestos a la imagen óptica de la nebulosa. Las velocidades LSR correspondientes a cada canal de frecuencia se indican en la esquina superior-izquierda. Las observaciones son excelentes, con una razón señal a ruido del orden de 700.

particular la presencia de un anillo secundario con un eje totalmente diferente del eje del anillo principal (que coincide con el eje global de la espectacular nebulosa). En la Fig. 2 vemos la modelización de la región molecular interna de NGC 6302, que incluye los dos anillos y zonas de la base de los lóbulos nebulares extensos que aún son ricas en moléculas.

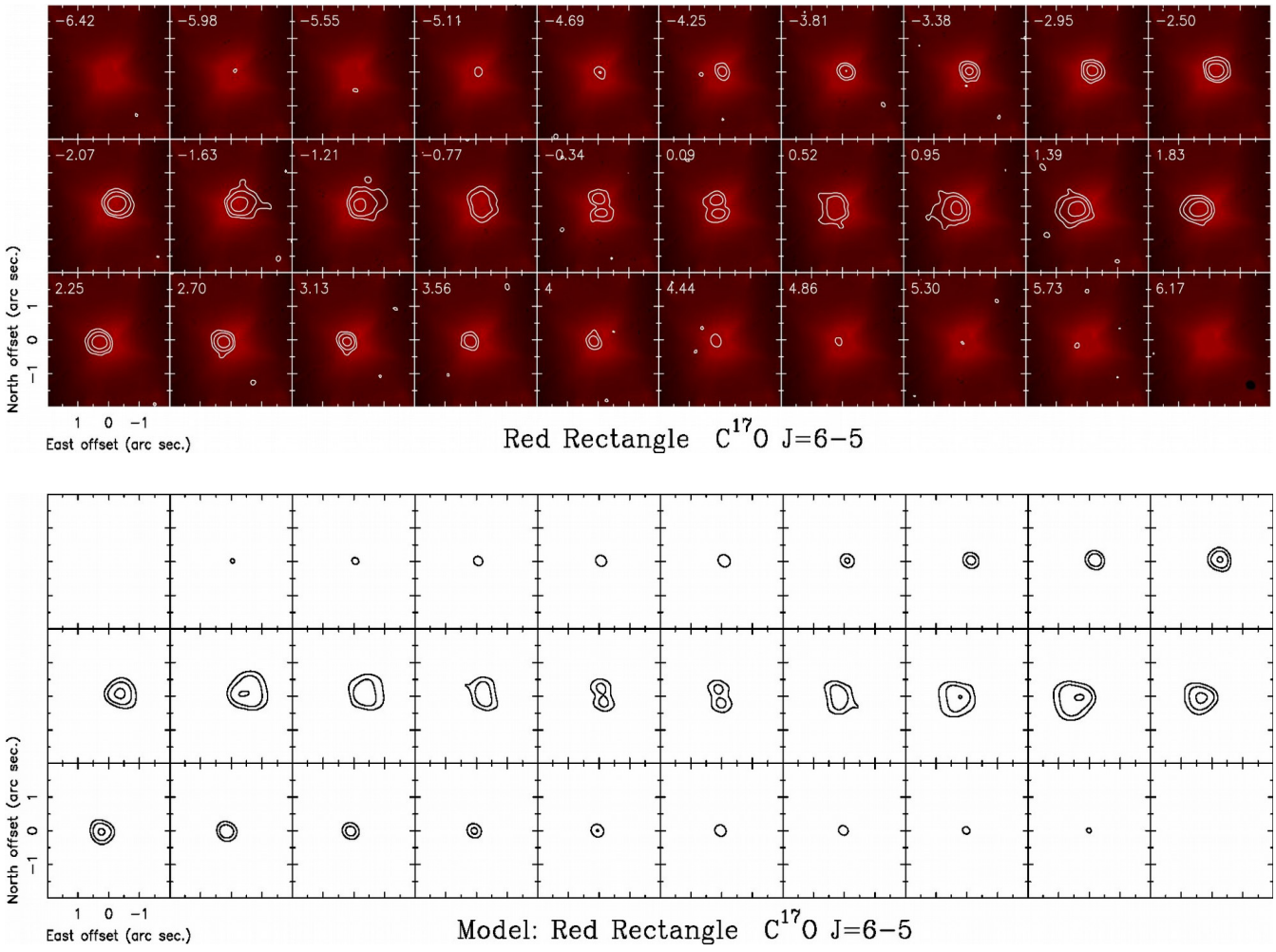
DISCOS EN ROTACIÓN KEPLERIANA O CUASI-KEPLERIANA ALREDEDOR DE ESTRELLAS POST-AGB

Hemos citado que en la mayoría de las nebulosas PNe y pPNe sólo se detecta gas en expansión; pero parece necesario que haya también gas en rotación, de cuya caída sobre las estrellas centrales podamos extraer la energía necesaria para explicar los potentes flujos bipolares observados en estas nebulosas. Sin embargo, fue sólo en 2003 que se detectó de manera convincente la presencia de tales discos rotantes, en la nebulosa llamada Rectángulo Rojo (RR). El RR pertenece a un tipo de objetos post-AGB, probablemente evolucionando para formar PNe, que tienen estrellas binarias en su centro y muestran propiedades que sugieren estructuras nebulares estables (y por lo tanto keplerianas), como un exceso en el NIR que es característico de polvo caliente que se mantiene cerca del estrella. Observaciones más recientes de ALMA han proporcionado una visión muy detallada del RR. Junto con el gas en rotación (la estructura ecuatorial que vemos en la Fig. 3), se ve también gas en expansión (siguiendo la forma de X de la imagen en el óptico y a velocidades algo mayores en valor absoluto), ver Bujarrabal et al. (2013, 2016).

Dedujimos del análisis de las observaciones que dicho gas en expansión había sido arrancado del disco por un proceso similar al que se espera que se produzca en discos de acrecimiento, pero mucho más lejos de la estrella e involucrando velocidades mucho menores, en nuestro caso de unos 5 – 15 km s^{-1}. De hecho, esta eyección de material desde el disco limitaría la vida de éste, para

el disco del RR encontramos una vida media de unos 10000 años, grande para un objeto proto-planetario e incluso para una nebulosa planetaria (la vida media de una PN detectable es del orden de 20000 años). En la Fig. 3 vemos emisión de ^{12}CO J=3-2, también se observaron las transiciones ^{13}CO J=3-2 (un isótopo menos abundante), ^{12}CO J=6-5, C^{17}O J=6-5 (un isótopo muy raro) y H^{13}CN J=4-3, además del continuo emitido por granos de polvo a las longitudes de onda 0.4 y 0.8 mm. En todos los casos, la calidad de los datos es realmente muy alta. En ^{13}CO J=3-2 apenas se detectó el gas en expansión, pues al ser las líneas de ^{13}CO más ópticamente delgadas su emisión muestra más claramente el contraste entre las zonas densas (disco) y las difusas (flujo). De hecho, el flujo no se detecta en absoluto en C^{17}O J=6-5, en la que domina por completo la emisión de las regiones interiores del disco; ver la Fig. 4, donde también mostramos la predicción del modelo que desarrollamos para esta fuente (podemos ver que el ajuste de los datos es satisfactorio).

Figura 4: observaciones del Rectángulo Rojo con ALMA en C^{17}O J=6-5 y modelización, la escala es mucho menor que para la Fig. 3. Sólo se detecta la zona central del disco kepleriano, más densa, debido a lo poco abundante que es este isótopo. Se puede apreciar la fiabilidad del modelo de disco en rotación.



Hasta el momento se han detectado otros 3 discos rotantes en fuentes que comparten las propiedades del RR antes citadas: AC Her (cartografiado con NOEMA), IW Car (datos ALMA, Bujarrabal et al. 2017) e IRAS 08544-4431 (datos ALMA aún no publicados). De estas, sólo AC Her no muestra signos de gas en expansión, aunque su presencia es muy probable a la vista del exceso en el continuo FIR de esta fuente. En otros tres objetos similares (observados con NOEMA), el disco ecuatorial está probablemente presente pero sólo se resuelve la emisión de extensos flujos. Observaciones sistemáticas con antena única han mostrado que la mayoría de las binarias post-AGB con exceso NIR muestran muy probablemente una estructura similar. Sin duda, la presencia de discos en rotación y de gas en expansión arrancado del disco es una propiedad generalizada entre este tipo de fuentes.

RESUMEN

ALMA ha demostrado una extraordinaria eficacia en el estudio de las nebulosas planetarias y preplanetarias, y muy en particular del espectacular proceso por el que se forman. Se han obtenido datos de una precisión sin precedentes sobre las diferentes componentes de estas nebulosas, que, eyectadas por una estrella vieja, normalmente están en expansión. También se han observado discos en rotación en el ecuador de las nebulosas, cuyo estudio es fundamental para entender los procesos evolutivos. Se ha demostrado que estos discos están perdiendo masa, dando lugar a flujos lentos. En general, se han deducido la estructura y dinámica de todas estas componentes, así como las principales condiciones físicas en ellas. En este artículo cito los trabajos publicados por astrónomos españoles y hago notar la importancia de su participación en las primeras observaciones con ALMA.

REFERENCIAS

Bujarrabal, V., Castro-Carrizo, A., Alcolea, J., et al., 2013, A&A, 517, L11.

Bujarrabal, V., Castro-Carrizo, A., Alcolea, J., et al., 2016, A&A,593, A92.

Bujarrabal, V., Castro-Carrizo, A., Alcolea, J., et al., 2017 A&A, 597, L5.

Castro-Carrizo, A., Bujarrabal, V., Neri, R., et al., 2017, A&A, 600, A4.

Santander-García, M., Bujarrabal, V., Alcolea, J., et al., 2015, A&A, 507, A27.

«La mayor parte de los trabajos basados en observaciones con ALMA de PNe y pPNe que se han publicado hasta ahora han sido liderados por astrónomos españoles.»

LA FORMACION DE UN SISTEMA PLANETARIO

Las estrellas se forman rodeadas de una estructura aplanada de gas y polvo, llamada disco protoplanetario porque posiblemente dará lugar a un sistema planetario. Anteriormente se creía que esto era algo excepcional. Pero ahora sabemos que la mayoría de las estrellas se originan con un sistema planetario, y que no todos son parecidos al nuestro. De hecho, los resultados muestran una gran diversidad de sistemas exoplanetarios, y algunos parecen tener (al menos hasta donde se conoce) un tamaño muy pequeño. Por tanto, uno podría esperar encontrar una diversidad similar de discos protoplanetarios, siendo algunos muy pequeños. Sin embargo, hasta ahora no se había encontrado una evidencia directa de ello.

Mayra Osorio
Instituto de Astrofisica
de Andalucia (IAA-CSIC)
osorio@iaa.es

HL Tau y XZ Tau son dos estrellas jóvenes (la primera más joven que la segunda) separadas entre sí por 4200 unidades astronómicas (ua) y que han nacido en la misma nube, en una región de formación estelar situada a 450 años luz de la Tierra. Esta región de formación estelar ha sido muy estudiada porque precisamente en esta región se descubrió (en el observatorio hispano-alemán de Calar Alto) el fenómeno de los "jets" en estrellas jóvenes (Mund & Fried 1983, ApJ, 274, L83). Estos "jets" son chorros muy colimados de gas parcialmente ionizado que son eyectados por las estrellas jóvenes a velocidades de centenares de km/s. Este mecanismo permite que la estrella se libere del exceso de momento angular y siga ganando masa. Tal como puede verse en la figura (Figura 1), HL Tau está asociada con un jet muy colimado, que fue uno de los primeros que se descubrieron. Por otra parte, más recientemente, el telescopio espacial Hubble (HST) obtuvo una serie de imágenes donde se registra una espectacular secuencia de burbujas en expansión, que son expulsadas por XZ Tau (Figura 1; Krist et al. 2008, AJ, 136, 1980), y cuyo origen preciso todavía no se conoce bien. Por tanto, en esta región se encuentran simultáneamente eyecciones de alta y de baja colimación.

Por otra parte, HL Tau fue una de las primeras estrellas jóvenes donde se sospechó que estaba rodeada de un disco de gas y polvo en rotación. Estos discos, los cuales ahora sabemos que tienen típicamente un tamaño del orden de 100 unidades astronómicas (ua), son de suma importancia puesto que a partir de ellos se forman los sistemas planetarios, y se denominan discos protoplanetarios.

El disco de HL Tau es muy brillante en ondas milimétricas, y seguramente por esta razón se escogió para ser observado durante la campaña de verificación de las configuraciones más extendidas (líneas de base más largas) del interferómetro Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). Las imágenes del disco de HL Tau que se obtuvieron con ALMA están posiblemente entre las más nítidas y revolucionarias que se hayan obtenido hasta ahora en el campo de la formación estelar. La figura 2 muestra la imagen de HL Tau obtenida con ALMA a 1.3mm (ALMA Partnership et al. 2015, ApJ, 808, L3) superpuesta, en su parte central, con la imagen a 7mm obtenida con el VLA (Carrasco-González et al 2016, ApJ, 821, L16). En las imágenes de ALMA se observan múltiples anillos

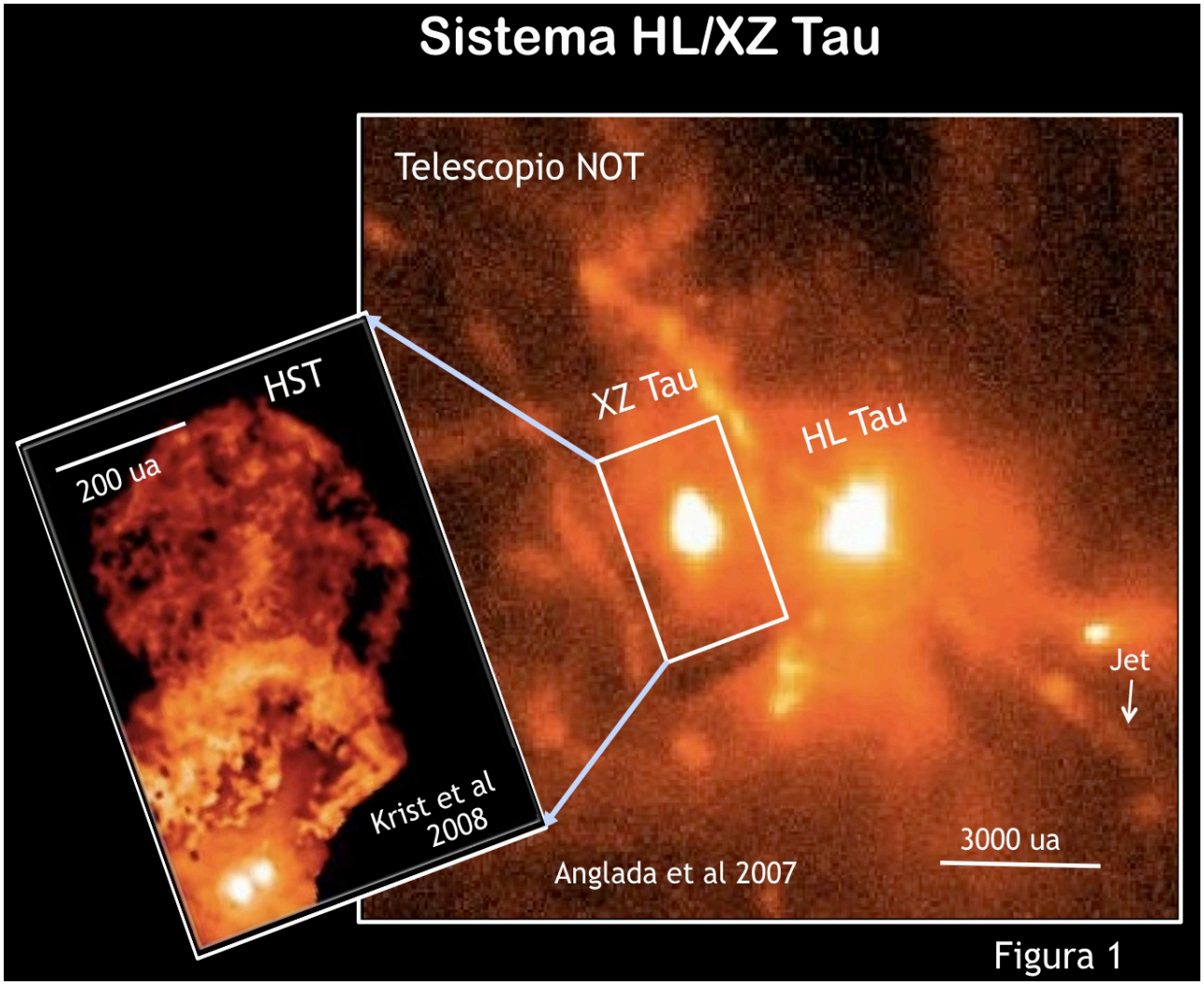


Figura 1

obscuros alternados con anillos brillantes alrededor de la estrella. Esta estructura del disco recuerda a los llamados discos de transición. Los discos de transición son un subgrupo de los discos protoplanetarios que se encuentran en un estado evolutivo en el cual han desarrollado cavidades y surcos alrededor de la estrella central. Se piensa que estas estructuras han sido producidas por las fuerzas de marea de embriones planetarios suficientemente masivos que limpian el material mientras orbitan alrededor de la estrella. Actualmente se están estudiando intensamente estos discos tanto a través de la emisión térmica y luz dispersada de los granos de polvo y como en gas para elucidar como es el proceso de formación planetaria.

Lo sorprendente, en el caso de HL Tau, es que la estrella es demasiado joven para encontrar en su disco un número tan grande de surcos, que indicarían que el proceso de formación planetaria se encuentra ya en una fase muy avanzada. En los últimos años se han tratado de encontrar mecanismos alternativos que expliquen la formación de los surcos observados en HL Tau, y se han hecho búsquedas en el infrarrojo, hasta ahora fallidas, de posibles planetas en ellos, utilizando el Very Large Telescope (VLT). Nuestras observaciones a 7 mm con muy alta resolución angular sugieren que HL Tau podría estar en una etapa muy temprana del proceso de formación planetaria, en la cual los embriones planetarios no

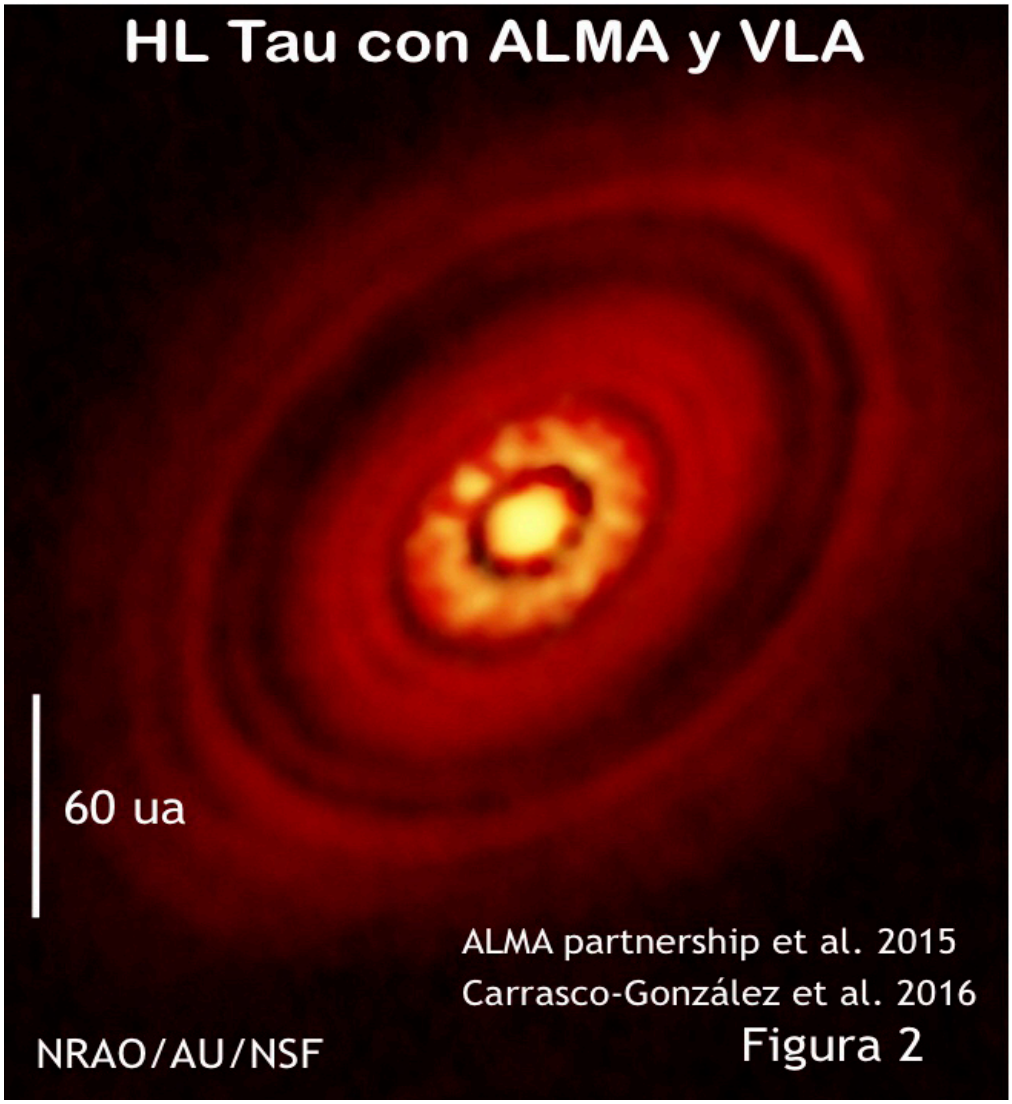


Figura 2

estarían en los surcos sino en los anillos (Figura 2; Carrasco-González et al. 2016, enlace 1).

Aunque las observaciones de ALMA se habían centrado en HL Tau, gracias a la gran sensibilidad de este instrumento, también puede observarse, en el borde del campo de visión, a su vecina XZ Tau B, que a su vez es muy interesante. Se sabe que XZ Tau es un sistema estelar múltiple, formado por dos componentes principales (XZ Tau A y XZ Tau B, siendo ambas estrellas enanas de tipo M) separadas entre sí 42 ua, y quizás con una tercera componente (XZ Tau C), mucho más próxima a XZ Tau A.

Analizando los datos de ALMA a 1.3 mm, que alcanzan una resolución angular de 0.03" (correspondiente a 4 ua a la distancia de la estrella) obtuvimos una imagen que nos permitió identificar la emisión de un disco de polvo alrededor de XZ Tau B, con unas características inauditas. La imagen revela que el disco tiene un tamaño extremadamente pequeño, con un radio de solo 3.4 ua (Osorio et al. 2016, 815, L10, Figura 3). Este resultado viene confirmado por los datos de ALMA a 3 mm, los cuales, aunque no resuelven espacialmente el disco, al tener mayor sensibilidad, sí permiten asegurar que el disco no se extiende hasta distancias mayores, confirmando su pequeño tamaño.

XZ Tau B tiene una edad del orden de 5 millones de años. La imagen a 1.3 mm que se muestra en la Figura 3 revela también que la emisión disminuye en la proximidad de la estrella, indicando que el disco de polvo presenta una cavidad central, lo cual sugiere que se trata de un disco de transición. De hecho, utilizando nuestros códigos de transporte radiativo para discos de transición hemos ajustado la distribución espectral de energía y la imagen, obteniendo valores (o un rango de valores posibles) para los parámetros físicos del disco. De este modo, hemos confirmado que el radio exterior del disco es de 3.4 ua, y el de la cavidad central es de 1.3 ua. Esta cavidad central sugiere que hay planetas gigantes formándose a distancias de la estrella menores de 1.3 ua. Según nuestras simulaciones hidrodinámicas, tres planetas, cada uno con una masa del orden de 0.1 veces la masa de Júpiter o superior, pueden producir una cavidad con unas características similares a las observadas en el disco de XZ Tau B. Por tanto, es posible que efectivamente la existencia de la cavidad central esté indicando que ya se ha iniciado el proceso de formación de planetas gigantes en su interior.

Dado que los planetas gigantes se forman preferentemente más allá de la llamada "línea de nieve", que sería el radio más allá del cual la temperatura del disco baja por debajo del punto de congelación del agua, es interesante verificar si esta hipótesis es consistente con las propiedades del disco de XZ Tau B. De acuerdo con nuestro modelo del disco, y dado que XZ Tau B es una estrella muy fría, la temperatura de congelación del agua se alcanza a un radio muy pequeño, de 0.5 ua (como comparación, en nuestro Sistema Solar, la línea de nieve está a 2.7 ua, es decir, más allá de la órbita de Marte). Por tanto, la línea de nieve se encuentra a un radio mucho menor que el de la cavidad y la formación de planetas gigantes es posible en su interior.

Los resultados del modelo indican también que el disco de XZ Tau B es extremadamente denso, incluso más denso que lo que resultaría de una simple extrapolación a radios pequeños de las leyes de densidad típicas de los discos grandes, resultando una masa del disco (gas+polvo) superior a unas 10 veces la masa de Júpiter. Esto implica que, aunque el tamaño del disco sea pequeño, tiene suficiente masa para formar un sistema planetario compacto. Pensamos que, puesto que se ha observado que existe una gran diversidad de sistemas exoplanetarios, es posible que también exista una diversidad similar en sus progenitores, los discos protoplanetarios. Por ejemplo, discos compactos similares al de XZ Tau B podrían ser los progenitores de los sistemas exoplanetarios muy compactos (con todos sus planetas conocidos dentro de un radio menor a 1 ua) que ha descubierto la misión Kepler (Kepler-11, Kepler-32, etc). También, los exoplanetas descubiertos en las estrellas cercanas de Próxima Centauri y Trappist-1, enanas de tipo M como XZ Tau B, se encuentran en órbitas de radio muy pequeño y podrían haberse formado a partir de discos protoplanetarios muy compactos, en lugar de a partir de un disco donde el material se extienda hasta radios de centenares de ua.

«Discos compactos similares al de XZ Tau B podrían ser los progenitores de los sistemas exoplanetarios muy pequeños, como los descubiertos en Proxima Centauri y Trappist-1»

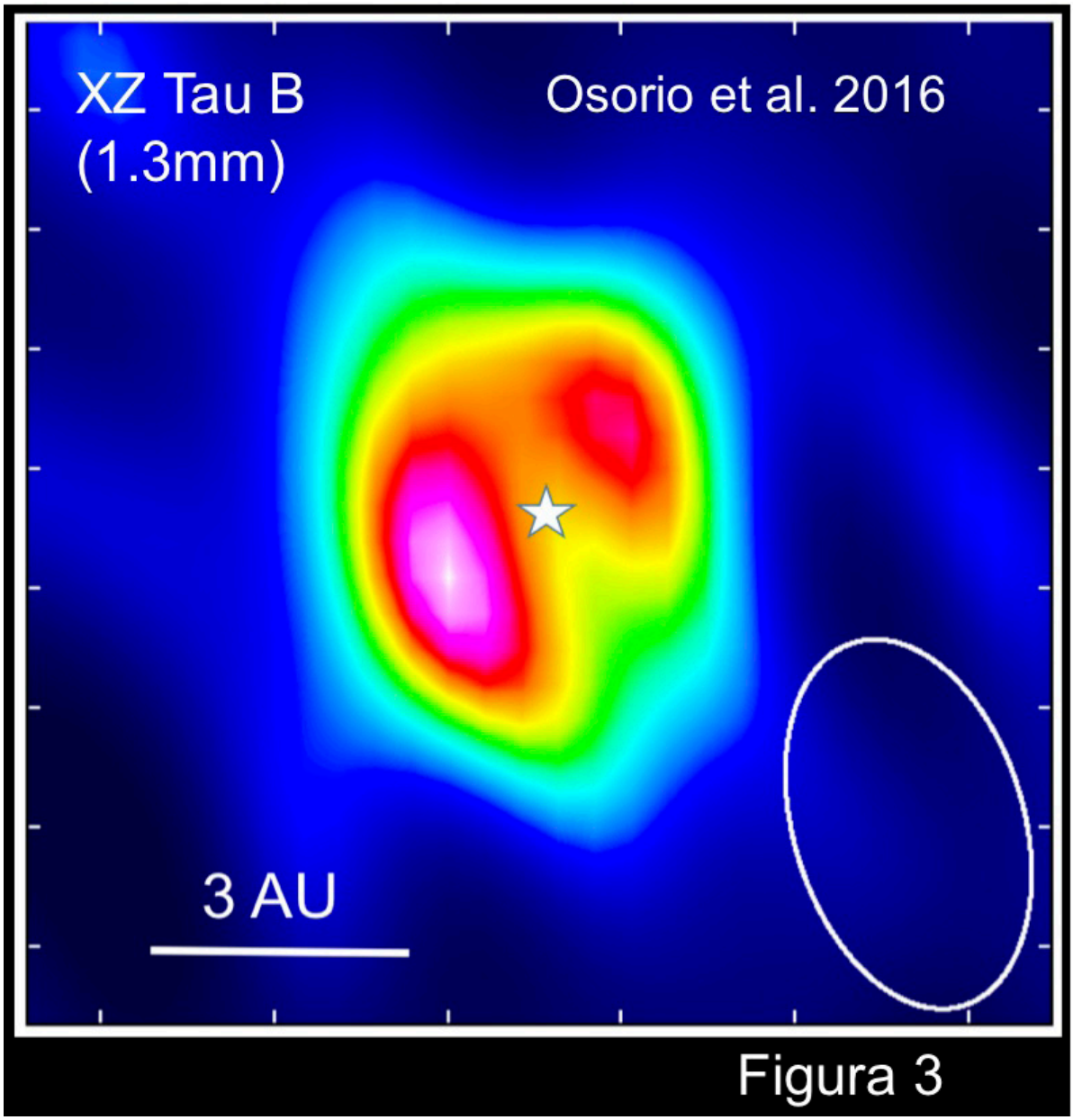


Figura 3

Otra de las cuestiones interesantes que plantea el descubrimiento del disco de XZ Tau B es tratar de entender por qué es tan pequeño. Una posibilidad es atribuir su pequeño tamaño a un truncamiento debido a las fuerzas de marea en una posible interacción con su estrella compañera, XZ Tau A, aunque los modelos sugieren que el disco truncado debería tener un radio mayor (unas 14 ua), del orden de un tercio de la separación entre las estrellas. Otra posibilidad puede ser que las potentes eyecciones de materia que sufre el sistema, observadas con el HST (ver Figura 1) pudieron haber arrancado las partes externas del disco. Por último, una tercera posibilidad podría ser que un protoplaneta en una órbita exterior al radio observado del disco podría haberlo truncado.

El disco de XZ Tau B parece presentar todos los ingredientes habituales en los discos de transición, pero en miniatura (Figura 4 muestra una comparación de XZ Tau B con un disco de transición típico). Por ello, resulta interesante considerar la posibilidad de usarlo como un modelo a escala de los discos mayores. En particular, el disco de XZ Tau B es azimutalmente asimétrico, siendo la parte situada al sureste más brillante que la situada al noreste. Este tipo de asimetrías se observan con cierta frecuencia en los discos de transición típicos, y se atribuyen a la acumulación de los granos de polvo de mayor tamaño en las llamadas "trampas de polvo", que se espera se formen cerca de la parte exterior de las paredes de las cavidades. Se considera que estas trampas de polvo juegan un papel importante en el proceso de formación de planetas, al impedir que caigan sobre la estrella antes de que alcancen un tamaño suficiente para posteriormente formar planetas. Hasta ahora no se ha observado cómo evolucionan estas trampas de polvo. En principio, estas asimetrías deberían seguir aproximadamente una rotación kepleriana, con periodos de décadas o siglos en los discos de transición típicos, mientras que en un disco como el de XZ Tau B podría observarse su evolución en escalas de solamente unos meses. De este modo, un seguimiento de estos discos enanos podría ayudar a entender definitvamente cómo ocurre el proceso completo de la formación planetaria en sus hermanos mayores como el que originó, hace 4600 millones de años, nuestro Sistema Solar.

ENLACE

[1] Next Generation Very Large Array: https://science.nrao.edu/futures/ngvla

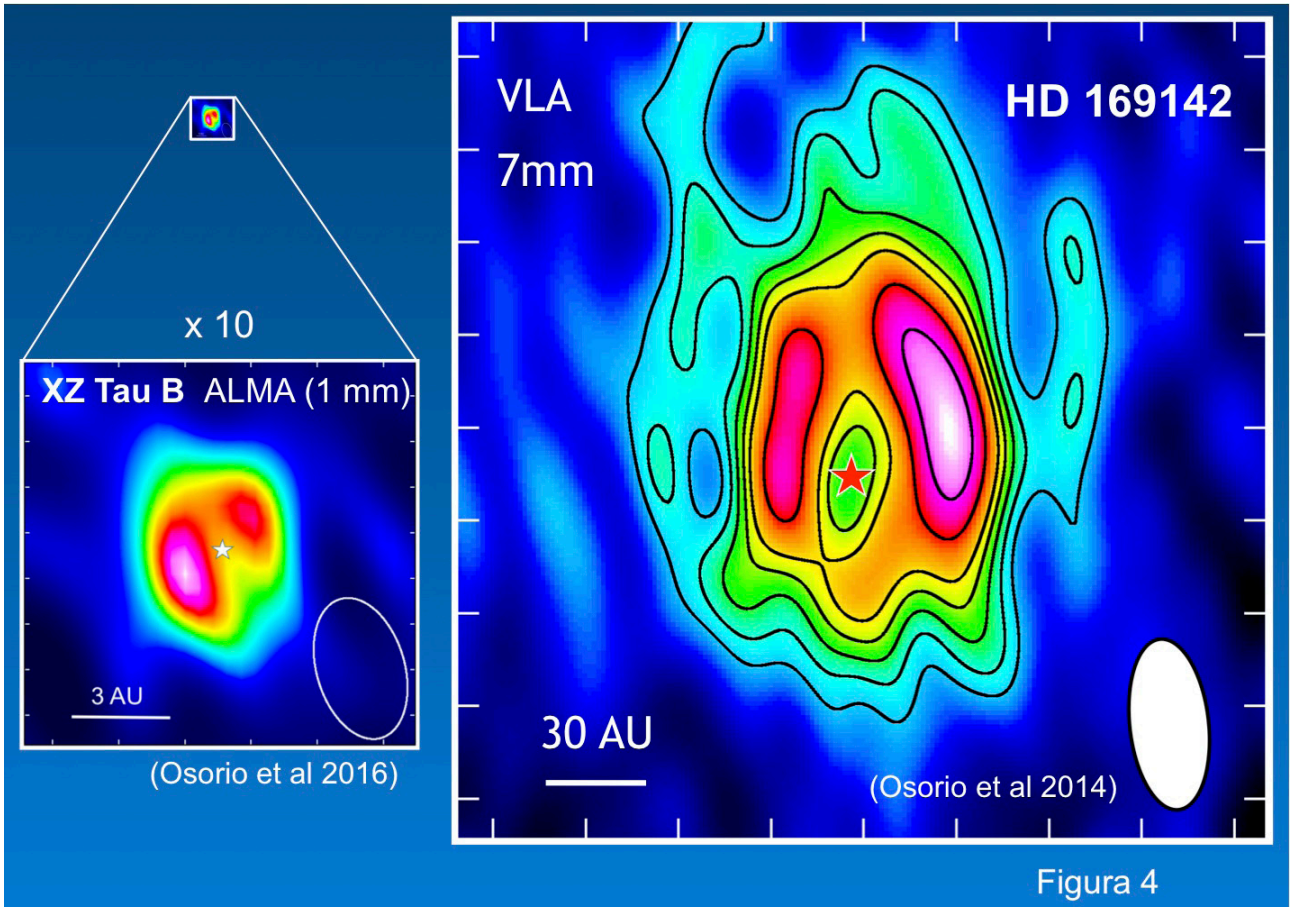


Figura 4

LAS ENANAS MARRONES

Las enanas marrones se definen como objetos subestelares con masas por debajo de 80 M_{Jup}: no han conseguido reunir suficiente material para fusionar hidrógeno en sus núcleos y por ello se las suele considerar estrellas "fallidas". Estos objetos tienen masas hasta ~13 M_{Jup} y, por tanto, son el puente entre las estrellas de baja masa y los planetas gigantes. De hecho, el estudio de las enanas marrones menos masivas proporciona información muy relevante relacionada con las atmósferas y la estructura interna de estos planetas.

Nuria Huélamo
nhuelamo@cab.inta-csic.es

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

Centro de Astrobiología
Dept. de Astrofísica (CSIC-INTA)

LA FORMACIÓN DE ENANAS MARRONES

En la última década se han detectado un gran número de enanas marrones en zonas de formación estelar, en cúmulos jóvenes y en el medio interestelar. Sin embargo, su proceso de formación sigue siendo materia de debate. Se han propuesto varios mecanismos para explicar su origen, siendo los más aceptados la fragmentación turbulenta de una nube molecular (un mecanismo de formación parecido al de las estrellas de baja masa), la eyección debida a encuentros dinámicos con sistemas estelares, la foto-evaporación de fragmentos pre-estelares más masivos, o la fragmentación de un disco circunestelar masivo. Por tanto, su formación podría tener lugar mediante un mecanismo análogo al de las estrellas de baja masa, o bien podrían formarse como planetas, dentro del disco de una estrella joven.

¿Es posible discriminar entre los distintos mecanismos de formación? La respuesta es afirmativa, ya que cada uno de estos mecanismos está asociado con distintas propiedades observacionales. Por ejemplo, si las enanas marrones se formasen como estrellas de baja masa, esperaríamos detectar grandes envolturas de polvo y gas, flujos moleculares y chorros de materia como los observados en las proto-estrellas. Por otro lado, si fuesen eyectadas, esperaríamos detectar discos truncados y, por tanto, relativamente pequeños. En cualquier caso, para poder diferenciar entre los distintos mecanismos de formación, y puesto que las estrellas y enanas marrones evolucionan rápidamente durante los primeros millones de años, es necesario observarlas en sus estadios evolutivos más tempranos, cuando aún conservan sus propiedades intactas.

Los primeros estudios de enanas marrones jóvenes se centraron en objetos que, si bien ya no estaban sumergidos en nubes de gas y polvo, aún presentaban indicadores de juventud tales como discos circunestelares, detectados a través de excesos infrarrojos, o evidencias de acrecimiento de materia a partir de la línea de Hα en emisión. Gracias a estos estudios se ha demostrado que las enanas marrones jóvenes muestran muchas similitudes con las estrellas T Tauri (estrellas jóvenes con tipos espectrales GKM), por lo que se ha sugerido que su mecanismo de formación podría ser semejante.

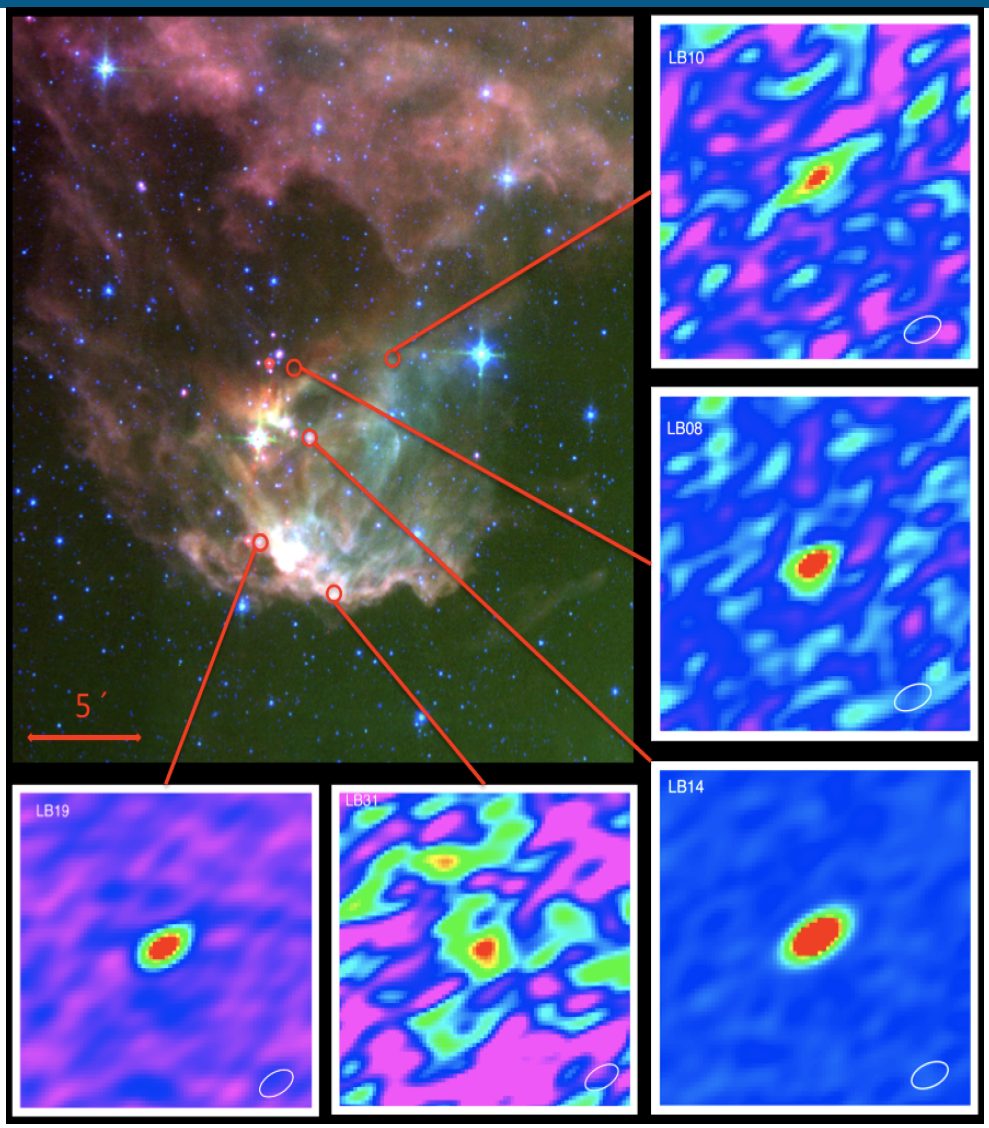


Figura 1: Imagen infrarroja de la nube Barnard 30, situada dentro de la región de Lambda Orionis. La imagen en tres colores de *Spitzer* corresponde a las bandas de 3.5 y 5.8 μm de IRAC y de 24 μm de MIPS. Los círculos rojos están centrados en las cinco detecciones obtenidas con ALMA, cuyas imágenes se muestran a la derecha y debajo de la imagen de Spitzer. En estos paneles se muestra un campo de 7"x7". El tamaño del haz está representado por una elipse blanca con un tamaño de 0.9" x 0.5".

Una forma de comprobar si realmente las enanas marrones y las estrellas comparten el mismo mecanismo de formación consiste en detectarlas en fases aún más tempranas de su evolución, cuando se encuentran sumergidas en nubes de gas y polvo. De hecho, en los últimos años se ha hecho un gran esfuerzo para identificar las llamadas proto-enanas marrones (PEMs), objetos subestelares que, si se han formado como las estrellas de baja masa, deberían presentar una fenomenología similar: envolturas de gran tamaño, flujos moleculares, chorros, y distribuciones espectrales de energía con máximos en el infrarrojo lejano.

¿Cuántas PEMs hay identificadas? Gracias al observatorio espacial *Spitzer* se han detectado objetos con luminosidades muy bajas llamados VeLLOs (*Very Low Luminosity Objects*), que son los mejores candidatos a PEMs. Otro grupo de objetos con baja luminosidad, cuyas propiedades son compatibles con las PEMS, son los llamados '*First Hydrostatic Cores*' (FHCs). Se caracterizan por exhibir luminosidades bolométricas menores que 0.5 $L_{\odot}$, masas muy pequeñas (0.04-0.1 $M_{\odot}$), distribuciones de energía con máximos a 100 μm, y por estar asociados con chorros de baja velocidad. Hasta la fecha hay varias fuentes que podrían ser FHCs. Sin embargo, y a pesar de los esfuerzos, el número de candidatos a PEMs sigue siendo demasiado pequeño (poco más de una decena) para poder sacar conclusiones acerca de su formación. Es necesario identificar y confirmar más candidatos para trabajar con una muestra estadísticamente significativa.

OBSERVACIONES DE ENANAS MARRONES CON ALMA

Puesto que las enanas marrones jóvenes y PEMs son objetos débiles asociados con envolturas de gas y polvo, discos circunsubestelares y flujos moleculares, uno de los rangos de longitud de onda más favorables para detectarlos es el (sub)milimétrico. Por tanto, el *Atacama Large Milimeter Array* (ALMA) es la herramienta ideal para la búsqueda y caracterización de este tipo de objetos. De hecho, en los cinco años de operaciones de ALMA varios programas de observación se han centrado en el estudio de enanas marrones jóvenes y PEMs. Los objetivos científicos han sido variados y están contribuyendo significativamente a comprender la formación de objetos en el rango subestelar.

En el caso de enanas marrones jóvenes, hay dos estudios que han proporcionado resultados muy novedosos. Uno de ellos es el de Ricci et al. (2014), que ha presentado observaciones en las Bandas 7 (338 GHz) y 3 (93 GHz) de tres enanas marrones en la región de Tauro. Gracias a ALMA se han podido resolver espacialmente los discos de polvo en torno a las tres fuentes, y se han estimando tamaños aproximados de entre 70 y 140 AU de radio, es decir, discos relativamente grandes, que no son compatibles con los esperados en caso de interacciones dinámicas: las simulaciones numéricas muestran que el 50% de los objetos de baja masa y subestelares tienen discos con radios externos menores que 10 AU, y menos del 10% tienen discos con radios mayores que 100 AU. Otro de los parámetros estimados, la pendiente de la distribución radial de polvo, está dentro de los rangos que se han medido en estrellas de baja masa en Tauro, sugiriendo que ambos objetos tienen un mecanismo de formación común.

Un resultado muy interesante proviene del índice espectral milimétrico (entre 1 y 3 mm) estimado a partir de las dos bandas de observación de ALMA: los valores de este índice sugieren la presencia de granos de polvo con tamaños milimétricos (o incluso mayores). Por tanto, el estudio confirma el crecimiento de los granos dentro de los discos de las enanas marrones, algo ya observado en estrellas de baja masa, y un paso fundamental para la formación de planetas dentro de los discos. De hecho, Ricci et al. (2014) también ha estudiado la posibilidad de formar planetas gigantes y rocosos dentro de estos discos circunsubestelares. Las masas de los tres discos detectados en Taurus oscilan entre 1-2 MJup (son de los discos más masivos detectados en torno a enanas marrones) y las pendientes de las distribuciones radiales del polvo tienen valores en torno a 1.2 y 1.6. La comparación de estos dos parámetros con modelos teóricos sugiere que en estos discos podrían formarse planetas rocosos con masas mayores que 1 $M_{\oplus}$. Por otro lado, no sería posible formar planetas gigantes.

Otro de los estudios más relevantes con ALMA es el de Testi et al. (2016), centrado en una muestra de 17 objetos subestelares con excesos infrarrojos (por tanto, con evidencias de discos circunsubestelares) en la región de Rho Ophiucus. ALMA ha detectado 11 de los 17 objetos en Banda 7 (890 μm), resolviendo espacialmente dos de ellos. Los once discos detectados tienen masas entre 0.5 y 6 $M_{\oplus}$, por lo que es improbable que lleguen a formar planetas. Los dos discos resueltos tienen radios externos menores o iguales que 25 AU y son, por tanto, mucho más pequeños que los tres detectados en Tauro. Los autores han sugerido que esta diferencia puede deberse a las distintas propiedades de las dos zonas de formación estelar, es decir, concluyen que el entorno en el que se han formado estos objetos podría explicar la existencia de discos tan diferentes. Finalmente, las masas de algunos de los discos de Rho Oph parecen no seguir la correlación con la masa del objeto central observada en estrellas de masa intermedia y baja, mostrando valores más pequeños que los esperados. Este resultado es consistente con enanas marrones que han sufrido interacciones dinámicas y, como resultado, tienen discos truncados y menos masivos, un escenario muy distinto al invocado para explicar los discos de Tauro.

Si consideramos los estadios más tempranos en la evolución de las enanas marrones, ALMA también está contribuyendo significativamente a la detección de nuevos candidatos a PEM. Dos ejemplos claros son los estudios en la nube Barnard 30 (Huélamo et al. 2017) y en la región de Lupus (proyecto SOLA, Itziar de Gregorio-Monsalvo).

Barnard 30 es una nube oscura en la región de Lambda Orionis. Esta región de formación estelar contiene un cúmulo central, Collinder 69, rodeado por un anillo de gas y polvo donde se han identificado varias nubes oscuras en las que se están formando nuevas estrellas. Una de estas nubes,

Barnard 30 (ver Figura 1), ha sido estudiada en detalle por Morales-Calderón (*PhD thesis*) a partir de datos infrarrojos de *Spitzer*, revelando un número significativo de proto-estrellas. Bayo (*PhD thesis*) ha confirmado espectroscópicamente un gran número de objetos jóvenes de baja masa. El análisis de datos sub-mm (870 μm) de la antena APEX ha proporcionado una treintena de detecciones en la nube, algunas de las cuales son compatibles con candidatos a PEMs. Estos objetos, extremadamente débiles, han sido observados con ALMA en Banda 7 (850 μm) y, como resultado, se han detectado cinco (ver Figura 1): dos de ellos son estrellas de baja masa muy jóvenes. Los otros tres no tienen contrapartidas en otras longitudes de onda y han sido clasificados como PEMS o pre-enanas marrones, es decir, nubes moleculares que no han colapsado aún y cuya masa es consistente con la formación de una futura enana marrón. Son objetos extremadamente jóvenes y menos evolucionados que las PEMs. Hasta la fecha sólo hay una pre-enana marrón confirmada, así que ALMA nos ha permitido identificar nuevos candidatos en Barnard 30, algo fundamental para comprender su proceso de formación.

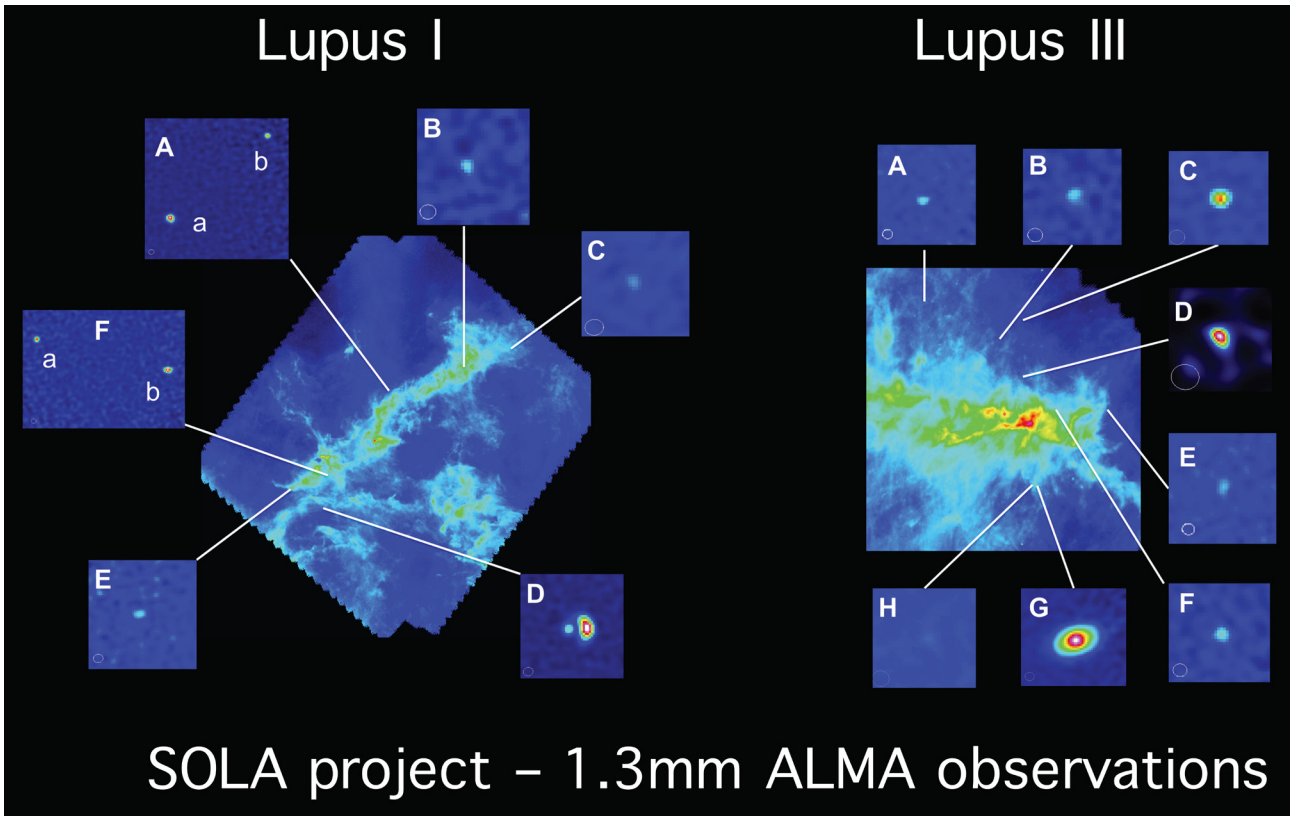
Otro gran proyecto que pretende clarificar el origen de las enanas marrones esta llevándose a cabo dentro del grupo científico SOLA (*Soul of Lupus with ALMA*), y está centrado en el estudio de pre- y proto-enanas marrones en dos nubes de la región de Lupus. ALMA ha observado varias zonas de estas nubes en Banda 6 (1.3 mm), detectando candidatos subestelares es fases muy tempranas de su formación (ver Figura 2). Gracias a este proyecto va a ser posible estudiar simultáneamente la formación estelar y subestelar en dos nubes muy cercanas, y extraer propiedades muy valiosas en un gran número de pre- y proto-enanas marrones.

Los trabajos mencionados anteriormente son sólo un ejemplo del potencial de ALMA para detectar y caracterizar objetos subestelares. Sin duda alguna, en los próximos años nos proporcionará información muy relevante para comprender el origen de las enanas marrones a partir de observaciones en distintas zonas de formación estelar.

PARA SABER MÁS

Ricci et al. 2014, ApJ 791, 20
Testi et al. 2016, A&A 593, 111
Huélamo et al. 2017, A&A 597, 17

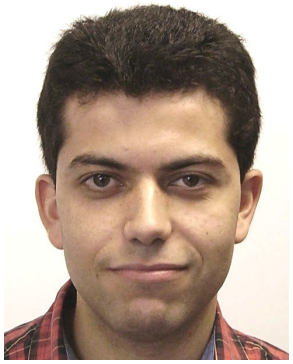
Figura 2: Observaciones de ALMA de las nubes Lupus I y III (de Gregorio-Monsalvo et al., en prep.) en Banda 6 (1.3 mm). Las imágenes centrales exhiben la emisión de las dos nubes a 250 μm con Herschel/SPIRE. Los paneles que rodean las imágenes centrales muestran el censo de objetos detectados con ALMA en cada nube. La mayor parte de estas detecciones están asociadas con pre- o proto-enanas marrones.



EN MARCHA LA XIII REUNIÓN CIENTÍFICA DE LA SEA

Dentro de poco más de un año, del 16 al 22 de julio de 2018, celebraremos en Salamanca la XIII Reunión Científica de nuestra Sociedad, como sabéis, el evento científico más importante que marca cada dos años el pulso de la SEA.

La Reunión Científica se celebra en Salamanca coincidiendo con el octavo centenario de la fundación de la Universidad en 1218, cuando el rey Alfonso IX de León estableció las Scholas Salamanticae. Junto con Bolonia, Oxford y París, Salamanca es una de las universidades más antiguas del mundo occidental.



Benjamín Montesinos
Coordinador de la Comisión Científica
bmm@cab.inta-csic.es

Fernando Buitrago
Coordinador del Comité Local Organizador
fbuitrago@oal.ul.pt

Como es tradición en las últimas Reuniones Científicas, la SEA invita a los representantes de una sociedad astronómica extranjera a integrarse en la reunión, con la intención de dar a conocer las colaboraciones existentes entre el país invitado y España, y fomentar nuevos lazos. En 2018, dada la proximidad cultural y geográfica de Portugal, será la comunidad astronómica lusa la que nos visite. Aprovechando esa proximidad, no deseamos solo limitarnos a una presencia institucional y a la participación en la sesión plenaria dedicada a las colaboraciones Portugal/España, sino que nos gustaría acoger a un buen número de miembros senior de la comunidad portuguesa, y lo que consideramos muy importante, mirando al futuro, de estudiantes de doctorado, a los que animaremos a presentar contribuciones en las sesiones paralelas.

Las sesiones cientificas se celebrarán en la Hospedería del Colegio Fonseca, en el centro histórico de la ciudad. La Hospedería tiene un auditorio para la sesiones plenarias, salones con diferentes capacidades para las sesiones paralelas y aulas para las reuniones de grupo. La Comisión Científica lleva trabajando desde comienzos de este año para preparar un programa atractivo. Las sesiones plenarias tocarán temas diversos y de actualidad: los últimos resultados en el campo de las ondas gravitatorias, el Data Release 2 de Gaia, los últimos avances en astronomía e instrumentación de alta resolución… son unas pinceladas de lo ofreceremos a la comunidad. Habrá una sesión plenaria dedicada a la enseñanza y divulgación de la astronomía. El Comité Local Organizador programará visitas a los edificios históricos y a la Biblioteca de la Universidad, y otras actividades que toda la ciudad de Salamanca podrá disfrutar.

Aprovechando el carácter universitario que se respira en cada rincón de la ciudad, se proporcionará alojamiento a los estudiantes en un colegio mayor, donde nos han ofrecido todas las facilidades que para el curso se dan a los colegiales: uso de las instalaciones del colegio tanto académicas como deportivas, wifi en todas las zonas, seguridad las 24 horas del día, y desayuno incluido. El colegio mayor está a menos de un cuarto de hora a pie de la Hospedería Fonseca.

Enviaremos antes de las vacaciones de verano una 'Circular 0' como anticipo a la puesta en marcha en septiembre de 2017 de toda la maquinaria organizativa de la Reunión Científica de cara a los participantes.

Os adjuntamos en esta reseña el cartel anunciador de la Reunión Científica. Veréis en él un cielo espectacular, el conocido como Cielo de Salamanca, atribuido al pintor Fernando Gallego (ca. 1440-1507), parte de una obra que decoraba el techo de la Biblioteca de la Universidad. Permaneció oculta sobre una bóveda durante años, hasta que en los años 50 del siglo pasado fue encontrada, restaurada y trasladada al Museo de la Universidad. El Cielo de Salamanca representa, entre otras, las constelaciones de los signos del zodiaco Leo, Virgo, Libra, Escorpio y Sagitario, las constelaciones de Hércules, Serpentario, Hidra y Centauro, los vientos y las estrellas, a modo de recopilación del saber y la tradición de la época sobre la astronomía y la astrología.

En esta sección de nuestro Boletín pretendemos mostrar la cara más social de los miembros de nuestra sociedad: entradas y salidas de comités, nombramiento de nuevos directores de centros, cambios de afiliaciones, jubilaciones, premios, etc. Si cuando acabéis de leer la sección pensáis "Podían haber hablado también de…" os pedimos que nos enviéis vuestra entrada para incluirla en el próximo número. Gracias.

GUILLEM ANGLADA-ESCUDÉ, ELEGIDO ENTRE LOS 10 CIENTÍFICOS MÁS DESTACADOS DEL AÑO 2016 POR NATURE

A finales del años pasado, fuera de plazo para el anterior boletín, recibimos la fantástica noticia de que nuestro compañero Guillem Anglada-Escudé había sido elegido uno de los 10 científicos más destacados del año 2016. Además la revista Time lo situó entre los 100 personajes más influyentes del mundo por sus descubrimientos en el campo de los exoplanetas. ¡Muchas felicidades, Guillem!

CAMBIO DE GESTORES

Desde el 1 de enero de 2017 el nuevo gestor del área de Astronomía y Astrofísica de la Agencia Estatal es Agustín Sánchez Lavega. En el área de Espacio, el nuevo gestor es José Carlos del Toro Iniesta. ¡Muchos ánimos para los dos!

PREMIO RAMON LLULL PARA ALÍCIA SINTES OLIVES

El Gobierno de las Islas Baleares concedió el pasado 21 de febrero el premio Ramon Llull 2017 en el ámbito de la investigación a Alícia Sintes Olives. Como sabéis Alícia lidera la participación de un grupo español en el proyecto LIGO, que acaba de confirmar la tercera detección de ondas gravitacionales. ¡Enhorabuena, Alícia!

WEB Y REDES SOCIALES DE LA SEA

Desde el pasado mes de abril, Anna Boluda ha dejado la gestión de contenidos de la web y las redes sociales de la SEA, después de más de siete años. Ahora la responsable de contenidos de la web y redes sociales de la SEA es Lorena Nieves (Observatorio Astronómico de la Universidad de Valencia). ¡Muchas gracias por todo, Anna, y bienvenida Lorena!

AGUSTÍN SÁNCHEZ LAVEGA, PREMIO EUSKADI DE INVESTIGACIÓN 2016

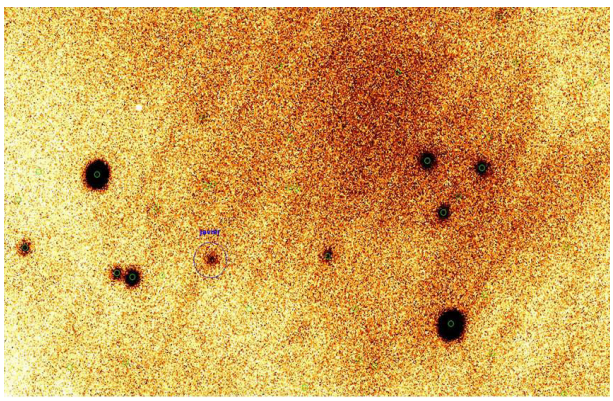
El departamento de Educación del Gobierno Vasco ha concedido el premio Euskadi de Investigación 2016 a nuestro compañero Agustín Sánchez Lavega por su relevante trayectoria investigadora y docente así como por la creación y consolidación del Grupo de Ciencias Planetarias de Euskadi. ¡Muchas felicidades, Agustín!

ROSA GONZÁLEZ DELGADO, SEGUNDA ASTRÓNOMA NOMBRADA PROFESORA DE INVESTIGACIÓN

El pasado mes de abril la Dra. Rosa González Delgado fue nombrada Profesora de Investigación del CSIC, siendo la segunda astrónoma que alcanza esta categoría. Es patente que se trata todavía de un tema en el que hay que mejorar mucho, puesto que en nuestro país hay muchas investigadoras con méritos más que suficientes. De momento, ¡enhorabuena, Rosa!

GOROSABEL, OFICIALMENTE EN EL CIELO

Desde el pasado mes de febrero, la IAU ha hecho oficial la designación del objeto hasta ahora conocido como (6192) 1990 KB1, que pasa a llamarse (6192) 1990 Javiergorosabel, en homenaje a nuestro compañero.



Asteroide (6192) Javiergorosabel

Imagen obtenida con el telescopio Yock-Allen desde la estación BOOTES-3 en Nueva Zelanda el 17 de febrero de 2017 (IAA-CSIC y NIWA)

LAS PALABRAS DEL CIELO

Daniel Kunth
Prólogo de
Jorge Wagensberg
Prefacio de
Hubert Reeves
ISBN: 978-84-16919-29-1
Editorial GEDISA

"Las palabras del cielo" es la traducción del original francés "Les mots du ciel", escrito hace unos años por nuestro colega Daniel Kunth, del Instituto de Astrofísica de Paris, cuya traducción acaba de publicar en España la editorial GEDISA. Daniel Kunth tiene una relación íntima y estrecha con el cosmos. Además de astrónomo profesional, que ha dedicado su carrera científica al estudio de la formación y evolución de las estrellas masivas a lo largo de la historia del Universo, Daniel es un enamorado del cielo, y esa pasión se destila en las páginas del libro. En "Las palabras del cielo" el autor plasma sus reflexiones y análisis acerca de cómo muchos términos astronómicos se han incorporado al lenguaje cotidiano, siendo a menudo empleados sin recordar su significado original.

En este libro Daniel hace un repaso de gran cantidad de términos y expresiones y analiza cómo han evolucionado hasta convertirse en elementos del lenguaje cotidiano. La Astronomía es sin duda la ciencia qué más influjo ha tenido en el desarrollo de las civilizaciones, desde que los seres humanos comenzaron a mirar al cielo por las noches, con una mezcla de incredulidad, respeto e incluso temor. ¿Qué eran esas luces que se veían en el firmamento? ¿Por qué algunas de ellas se movían misteriosamente a lo largo de las semanas, y otras no? ¿Y por qué surgían de vez en cuando nuevas estrellas en el cielo, a veces con largas colas cometarias, desapareciendo a los pocos días? Pero la contemplación del cielo nocturno no sólo inspiraba temor: también fue aprovechada desde tiempos inmemoriales para establecer los calendarios que marcaban el fluir de las estaciones e indicaban cuándo había que sembrar, y cuándo había que recoger las cosechas.

Numerosas palabras relacionadas con fenómenos astronómicos se fueron incorporando poco a poco al lenguaje, como "canícula", que refiere al periodo del año en que Sirio (la estrella más brillante de la constelación Can Mayor) comenzaba a hacerse visible por la noche, lo que en tiempos de los romanos sucedía al comienzo del verano, o "desear" (del latín desiderare: dejar de contemplar la estrella) o "desastre" (del italiano disastro: mal astro). Daniel nos invita a reflexionar sobre muchas de estas palabras, recopiladas y analizadas a lo largo de muchos años, sumergiéndonos en su origen y manifestando nuestra necesidad de comprender. Todo ello descrito con un tono intimista y poético, propios de su carácter. Este libro, en el territorio fronterizo de la ciencia y el lenguaje, nos descubrirá significados inadvertidos y nos ayudará a comprender mejor ese cielo inscrito en las palabras y que siempre ha estimulado nuestra imaginación.

El libro incluye un glosario con el significado científico de la mayoría de los términos descritos, para satisfacer la curiosidad del lector no especializado, así como una pequeña reseña de los astrónomos y científicos citados en la obra.

José Miguel Mas Hesse
Centro de Astrobiología
Dept. de Astrofísica (CSIC-INTA)

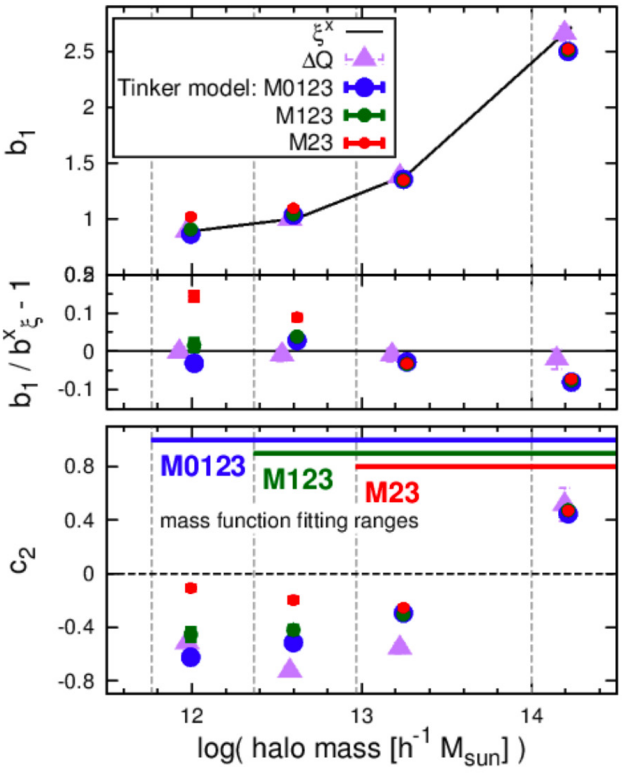
Cosmología con agrupación de galaxias

Autor: Kai Hoffmann
(Hoffmann@tsinghua.edu.es)
Tesis doctoral dirigida por: Enrique Gaztañaga
Centro: Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC-CSIC) / Universitat Autónoma de Barcelona
Fecha de lectura: 11 de Junio de 2015

Para distinguir entre modelos cosmológicos mediante medidas de crecimiento de las fluctuaciones de la materia a gran escala es primordial entender cómo las galaxias que observamos trazan el campo de densidad de todo el conjunto de la materia. La relación entre el campo de densidad de materia y el de galaxias suele aproximarse con una expansión de segundo orden de la función sesgo, llamada *bias* en inglés. La libertad en los parámetros de esta función de *bias* limita la información cosmológica que se puede extraer de las observaciones. En esta tesis estudiamos dos métodos para determinar los parámetros del *bias* independientemente del crecimiento. El análisis se basa en el estudio de la distribución de materia de la simulación *MICE Grand Challenge*. Los halos, identificados en esta simulación, se asocian a galaxias. El primer método consiste en medir directamente los parámetros del *bias* de estadísticas de tercer orden de las distribuciones de halos y de materia. El segundo en predecir a partir de la abundancia de halos en función de su masa (concepto al que nos referiremos como función de masas). Nuestras estimaciones del *bias* con estadísticas de tercer orden se basan en las auto-correlaciones y correlaciones cruzadas de tres puntos de los campos de densidad de halos y de materia, en el espacio de configuración o tridimensional. Usando las auto-correlaciones de tres puntos y un modelo local y cuadrático del *bias* encontramos una sobre-estimación del $\sim$ 20% en el parámetro lineal del *bias* respecto a la referencia proveniente de correlaciones de dos puntos. Esta desviación puede deberse a ignorar contribuciones no locales o de orden superior en la función del *bias*, así como a efectos sistemáticos en las medidas. El efecto de estas inexactitudes en el *bias* sobre las estimaciones del crecimiento es comparable con los errores procedentes del tamaño de la muestra y del ruido asociado a estas mediciones. También presentamos un nuevo método para medir el crecimiento que no requiere de un modelo para la correlación de tres puntos de la materia oscura. Los resultados de ambos enfoques están en consonancia con las simulaciones. Combinando las autocorrelaciones y las correlaciones cruzadas de tres puntos, por un lado podemos medir el *bias* lineal sin ser afectados por términos cuadráticos (locales o no locales) en las funciones del *bias*, y por otro podemos aislar estos términos y compararlos con las predicciones. Nuestras medidas de *bias* lineal a partir de estas combinaciones son consistentes con el bias *lineal* de referencia. La comparación de las contribuciones no locales con las predicciones revelan una fuerte dependencia de las medidas con la escala con desviaciones significativas de las predicciones, incluido a escalas muy grandes.

Nuestro segundo enfoque para obtener los parámetros de *bias* está basado en las predicciones derivadas de la función de masa a través de la aproximación de *peak-background split*, que separa la contribución local de la del fondo. Encontramos desviaciones significativas del 5-10% entre estas predicciones y la referencia a partir de las estadísticas de dos puntos. Estas desviaciones pueden ser explicadas en parte a partir de los efectos sistemáticos que afectan a las predicciones de *bias*, proveniente del *bineado* de la función de masa de halos, la estimación del error de la función de masa y la parametrización de la function de masa a partir de la cual se derivan las predicciones de *bias*. Estudiando la función de masa encontramos relaciones entre diferentes parametrizaciones de la función de masa. Además, encontramos que el método standard de *Jack-Knife* sobreestima la covarianza de errores en la función de masa en el rango de baja masa. Presentamos un modelo analítico que da cuenta de estas desviaciones y presentamos un nuevo estimador de covarianza mejorado.

Valores de bias lineal y cuadrático en función de la masa de los halos. Las líneas negras muestran las estimaciones del *bias* usando la correlacion de dos puntos de galaxias y materia. Triángulos púrpuras son estimaciones usando la combinación de autocorrelaciones y correlaciones cruzadas de tres puntos. Los puntos coloreados muestran predicciones teoricas con la aproximación "*peak-background split*", que se basan en el modelo de función de masa de Tinker (2010).



Cosmología con cartografiados galácticos: cómo las galaxias trazan la masa a grandes escalas

Autor: Arnau Pujol Vallribera
(arnaupv@gmail.com)
Tesis doctoral dirigida por: Enrique Gaztañaga
Centro: Institut Ciències de l'Espai (ICE IEEC-CSIC) / Universitat Autónoma de Barcelona
Fecha de lectura: 26 de Mayo de 2016

En esta tesis hemos estudiado la relación entre la distribución de galaxias y la de materia oscura y su aplicación en cartografiados galácticos. Los cartografiados galácticos son una herramienta crucial para entender la cosmología. La distribución de las galaxias a gran escala permite estudiar la formación de estructuras y su evolución, que son ingredientes necesarios para estudiar la evolución y el contenido del universo. Sin embargo, según el modelo estandard de cosmología, conocido como ΛCDM, la mayoría de la materia está formada por materia oscura, que no interacciona con la luz. Por lo tanto, las galaxias que observamos con los telescopios representan una pequeña fracción de la distribución total de la materia del universo. Es por eso que es necesario entender la relación entre galaxias y materia oscura para poder inferir la distribución de toda la materia del universo a través de las observaciones de galaxias.

Las simulaciones son una herramienta importante para predecir la formación y evolución de las estructuras de materia oscura y para estudiar la formación de galaxias. En las simulaciones se pueden estudiar los *halos*, que corresponden a sobredensidades de materia oscura formadas por colapso gravitatorio. Las simulaciones permiten estudiar el impacto de diferentes cosmologias y modelos de formación de galaxias en las estructuras a gran escala finales que forman la materia y las galaxias.

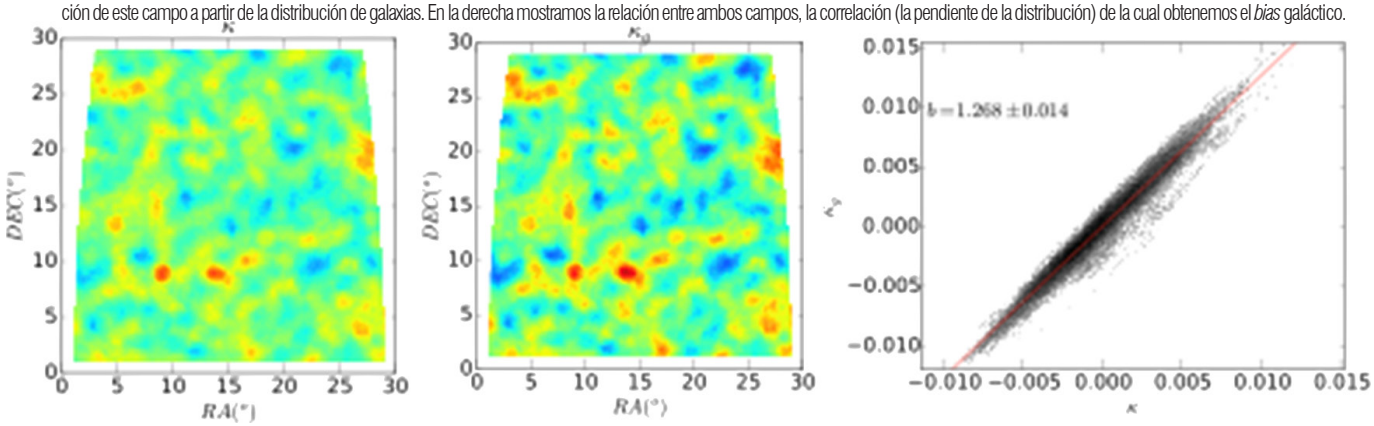
A gran escala, las galaxias trazan la distribución de materia. En particular, las fluctuaciones de densidad de galaxias a gran escala son proporcionales a las fluctuaciones de materia por un factor conocido como *bias* galáctico. Este factor permite inferir la distribución de materia total a partir de la distribución de galaxias, y por lo tanto el conocimiento del *bias* galáctico tiene un impacto directo en nuestros estudios cosmológicos.

Hay diferentes técnicas para estudiar el *bias galáctico*, en esta tesis nos focalizamos en dos. La primera utiliza el hecho que el *bias* galáctico puede ser modelado a partir de un modelo de formación de galaxias. Un de los modelos más comunes es el modelo *Halo Occupation Distribution* (HOD), o distribución de ocupación de halos, que asume que las galaxias pueblan halos de materia oscura sólo según la masa de estos halos. Con esta hipótesis, y asumiendo que el *bias* de halos sólo depende de su masa, podemos relacionar el bias de galaxias con el *bias* de halos. Sin embargo, esta hipótesis no es siempre suficientemente precisa. En este estudio utilizamos la simulación *Millennium* para estudiar el *bias* galáctico y el de halos, la dependencia en la masa del *bias* y sus efectos en las predicciones del *bias* galáctico. Hemos encontrado que la ocupación de galaxias en halos no sólo depende de su masa, y asumir esto produce un error en la predicción del *bias* galáctico. Hemos estudiado la dependencia del *bias* de halos en la densidad local de materia y hemos visto que la densitad es una propiedad que determina mucho mejor el *bias* que la masa. Cuando un conjunto de galaxias viene seleccionado por propiedades que estan correlacionadas con la densidad, la asunción de que el *bias* de halos sólo depende de su masa falla. En la tesis mostramos que en estos casos obtenemos una predicción del *bias* galáctico mucho más precisa utilizando la dependencia del *bias* de halos en la densidad. Finalmente, sugerimos utilizar información sobre la densidad local y no sólo la masa de halos para predecir el *bias* galáctico en cartografiados galácticos.

Otra técnica para estudiar el *bias* galáctico es utilizando *weak gravitational lensing* (lentes gravitacionales débiles) para medir la distribución de materia oscura en observaciones. *Weak gravitational lensing* es el campo que estudia las distorsiones débiles en las imágenes de las galaxias debidas a la desviación gravitatoria de la luz producida por la distribución de materia en la trayectoria de la luz. Estas distorsiones permiten inferir la distribución a gran escala de la materia total (bariónica y oscura). En esta tesis desarrollamos y estudiamos un nuevo método para medir el *bias* galáctico a partir de la combinación de mapas de *weak lensing* y el mapa de distribución de galaxias. El método consiste en reconstruir el mapa de *weak lensing* a partir de la distribución de galaxias de delante del mapa. El *bias* galáctico es medido a partir de las correlaciones del mapa de *weak lensing* reconstruido y el real. Al ser un método nuevo, hemos utilizado simulaciones para estudiar y testar los diferentes sistemáticos del método y hemos estudiado los regímenes en los que el método es consistente con la teoria y otros métodos para medir el *bias*. Hemos encontrado que podemos medir el *bias* correctamente con esta técnica, y que este método es un buen complemento de otros para medir el *bias* galáctico, puesto que utiliza diferentes asunciones y depende diferentemente de los parámetros cosmológicos. Combinando nuestro método con otros nos permite medir el *bias* galáctico con más precisión al mismo tiempo que los parámetros cosmológicos. Este método ya ha sido aplicado en las observaciones del *Dark Energy Survey* (Chang et al. 2016).

Tesis disponible en:
http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/385515/apv-1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ejemplo de medición del *bias* galáctico utilizando *weak gravitational lensing*. En la izquierda mostramos el campo de *weak lensing* obtenido en la simulación MICE. En el medio mostramos la reconstucción de este campo a partir de la distribución de galaxias. En la derecha mostramos la relación entre ambos campos, la correlación (la pendiente de la distribución) de la cual obtenemos el *bias* galáctico.



Radioemisión de estrellas binarias en el grupo móvil AB Doradus

Autora: Rebecca Azulay Romero
(Rebecca.Azulay@uv.es)
Tesis doctoral dirigida por:
José Carlos Guirado Puerta
Centro: Universidad de Valencia
Fecha de lectura: 15 de Junio de 2016

En esta tesis, presentamos un estudio de la radioemisión y la cinemática de un conjunto de estrellas pertenecientes al grupo móvil AB Doradus a través de observaciones de VLA y VLBI. El principal objetivo de nuestro estudio es obtener estimaciones precisas de la masa dinámica de estrellas jóvenes de baja masa que, en combinación con medidas fotométricas, proporcionen puntos de calibración para modelos de evolución estelar de la pre-secuencia principal (PMS). La calibración de los modelos PMS parece esencial ya que son extensamente usados para predecir las masas de objetos poco masivos, como enanas marrones y planetas. Estudios previos muestran que las predicciones de los modelos están en desacuerdo con los resultados experimentales para masas inferiores a 1.2 $M_{\odot}$. De entre todas las estrellas incluidas en nuestro estudio, enfatizamos los resultados obtenidos en dos de ellas: AB Dor B y HD 160934.

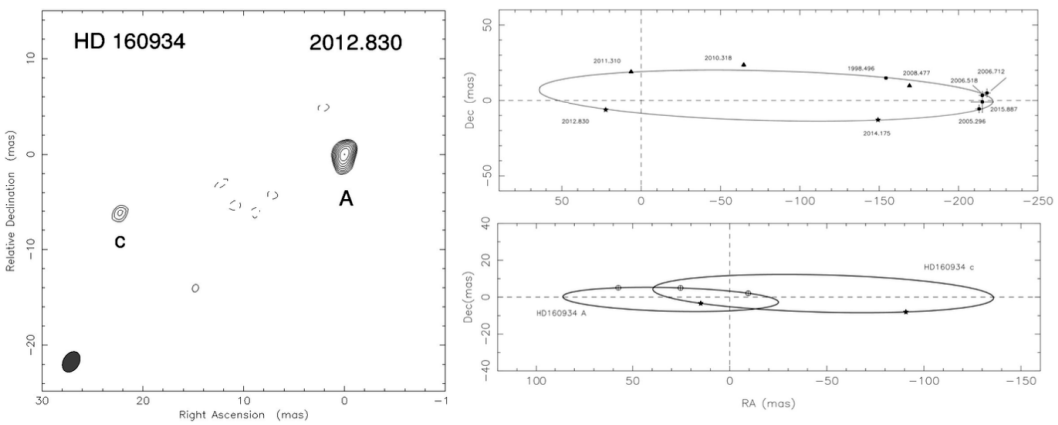
El sistema binario AB Dor B se observó en tres épocas entre 2007 y 2013 con la red australiana de VLBI (*Australian Long Baseline Array*, LBA) a una frecuencia de 8.4 GHz. Detectamos, por primera vez, radioemisión compacta de las dos estrellas en la binaria, AB Dor Ba y AB Dor Bb. Este resultado nos permitió determinar los parámetros orbitales de la órbita relativa y de las órbitas absolutas y, consecuentemente, las masas dinámicas individuales: 0.28±0.05 $M_{\odot}$ y 0.25±0.05 $M_{\odot}$, respectivamente. Comparaciones de las masas dinámicas con la predicción de los modelos evolutivos PMS muestran que los modelos subestiman las masas dinámicas de las componentes Ba y Bb de la binaria en un 10-30% y un 10-40%, respectivamente, aunque este desacuerdo no supera el nivel de 2σ. Algunos de los modelos estelares consideran favorable una edad de entre 50 y 100 Myr para este sistema, mientras que otros predicen edades más avanzadas. Junto con AB Dor B, observamos también el conocido sistema estelar AB Dor A, situado a tan sólo 9" y compuesto por la propia estrella AB Dor A y por AB Dor C. Los nuevos datos nos obligaron a revisar los valores previamente publicados de los parámetros orbitales y de las masas dinámicas. En particular, encontramos que las masas de las componentes AB Dor A y AB Dor C son 0.86±0.09 $M_{\odot}$ y 0.090±0.003 $M_{\odot}$, respectivamente, que nos permitieron comparaciones con los modelos teóricos estelares. En el caso de AB Dor A, los modelos predicen buenos estimados dentro de las incertidumbres, favoreciendo una edad temprana de entre 35-50 Myr. En el caso de AB Dor C, los modelos derivan una masa similar a la masa dinámica y una edad de entre 40 y 120 Myr.

Respecto a HD 160934, observamos este sistema con la red europea de VLBI (*European VLBI Network*, EVN) a 5 GHz en tres épocas entre 2012 y 2014. Vimos que las dos componentes de la binaria, HD 160934 A y HD 160934 c, muestran radioemisión compacta a escalas de VLBI, proporcionando una información precisa de la órbita relativa y de las órbitas absolutas, las cuales fueron analizadas en combinación con medidas orbitales previamente publicadas. Hemos obtenido valores revisados de los elementos orbitales así como de las masas individuales, cuyos estimados fueron 0.70±0.07 $M_{\odot}$ y 0.45±0.04 $M_{\odot}$ para las componentes A y c, respectivamente. Los modelos teóricos predicen masas para la componente A un 10% más bajas que nuestro valor dinámico; de la misma manera las predicciones para la componente c son un 20-40% más bajas que nuestra medida dinámica. La edad del sistema varía entre 40 y 65 Myr dependiendo de los modelos.

Otras estrellas de nuestra muestra incluyen a EK Dra, LO Peg y PW And, observadas con el EVN a 5 GHz. EK Dra y PW And mostraron radioemisión compacta a escalas de milisegundos de arco, mientras que LO Peg presentaba ausencia de emisión en el momento de las observaciones. El escaso número de detecciones nos impidió obtener estimados de sus masas, sin embargo, nos permitieron revisar los valores del movimiento propio y paralaje. De manera complementaria, observaciones en infrarrojo de la compañera de EK Dra nos han permitido una revisión de los parámetros orbitales de este sistema.

En resumen, nuestro proyecto proporciona nuevos datos observacionales para calibrar modelos de evolución estelar de objetos PMS, apoyando la evidencia de que estos modelos tienden a subestimar las masas dinámicas. La llegada de telescopios nuevos y más sensibles con una enorme capacidad de monitorización permitirán un estudio exhaustivo de la radioemisión presente en los grupos móviles encontrados hasta ahora, definitivamente incrementando el número de estrellas PMS con masas dinámicas determinadas.

Tesis disponible en:
http://roderic.uv.es/handle/10550/53955



Las estrellas binarias en grupos móviles jóvenes y cercanos son buenas candidatas para calibrar los modelos teóricos de evolución estelar de estrellas PMS. La emisión en radio de estos objetos permite aplicar técnicas astrométricas con las que es posible determinar las masas dinámicas con mucha precisión.

Nuevas perspectivas en supergigantes rojas: propiedades estelares a partir de grandes muestras, relaciones empíricas y aplicaciones

Autor: Ricardo Dorda Laforet
(ri.dorda@gmail.com)
Tesis doctoral dirigida por:
Ignacio Negueruela Díez
Centro: Universidad de Alicante
Fecha de lectura: 21 de Junio de 2016

Las supergigantes rojas (SGR) son estrellas evolucionadas de masa moderadamente alta (entre 10 y 40 masas solares), que se caracterizan por sus bajas temperaturas y su alta luminosidad. Estas estrellas son clave para la comprensión de la evolución y muerte de las estrellas de alta masa. Por un lado, los modelos de evolución estelar encuentran en la población de SGR una prueba muy exigente, ya que estas estrellas tienen condiciones extremas y no duran mucho en dicho estado evolutivo antes de cambiar o morir. Por otro lado, se sabe que las SGR son las progenitoras de las supernovas tipo IIP. Así, la comprensión de las últimas fases previas a la supernova resulta esencial para entender la muerte de estas estrellas. Pese a todo ello, aún existe desacuerdo sobre las propiedades básicas de las SGR.

El objetivo en este trabajo es doble. Por un lado, buscamos caracterizar las SGR como población y, a partir de ello, poner a prueba las teorías más recientes sobre la naturaleza de estos objetos. Por otro lado se pretende obtener un método automático para distinguir las SGR de las estrellas gigantes rojas que son mucho más abundantes, a partir de su caracterización espectral. Con estos objetivos en mente, la estrategia empleada ha sido la observación y análisis de la mayor muestra espectroscópica de este tipo de objetos hasta la fecha, en tres galaxias diferentes: Vía Láctea y ambas Nubes de Magallanes.

La muestra fue observada tanto en el rango óptico, en el que están definidos los criterios de clasificación espectral, como en la región del infrarrojo cercano del Triplete de Calcio (TC), que se ubica cerca del máximo de emisión de estas estrellas y es por tanto muy accesible incluso en estrellas afectadas de una fuerte extinción. Todas las estrellas fueron clasificadas espectralmente y en luminosidad mediante su rango óptico. Además, todos sus rasgos espectrales significativos del rango del TC fueron medidos homogéneamente. Finalmente, se calcularon las magnitudes bolométricas absolutas de las SGR observadas en las Nubes de Magallanes, a partir de la fotometría infrarroja existente.

El análisis se estructuró alrededor de la comparativa entre la clasificación realizada, los valores medidos, las magnitudes absolutas obtenidas y las predicciones hechas por los modelos de atmósferas estelares y de evolución estelar. A partir de ellos confirmamos algunas de las sospechas existentes en la literatura sobre estas estrellas, como la relación entre tipo espectral, luminosidad y pérdida de masa, mientras que encontramos fuertes evidencias en contra de algunas de las propuestas más recientes sobre el funcionamiento de estos objetos, como la hipótesis de que todas las SGR tienen aproximadamente la misma temperatura con independencia de su tipo espectral. Más aún, nuestros resultados se basan en la mayor muestra de SGR observada y analizada hasta la fecha. Por otro lado, hemos obtenido resultados relativos a la distribución de tipos espectrales observada en cada galaxia, que no han sido descritos antes en la literatura: la existencia de dos fases evolutivas cualitativamente diferentes dentro de las SGR, lo que tiene implicaciones fundamentales para el conocimiento y caracterización de estos objetos.

Finalmente, a partir del análisis espectroscópico, se ha desarrollado un método automatizado de identificación y clasificación de SGR con una eficiencia significativamente superior a los métodos clásicos empleados. Más aún, como parte del trabajo se creó una aplicación específica para el rango espectral cubierto por *Gaia*, permitiendo así la identificación de supergigantes rojas a partir de sus observaciones. Se ha aplicado este método a dos muestras problema de SGR que observamos en dos regiones diferentes de la Galaxia (brazo de Perseo y la base del brazo de Scutum-Crux), obteniendo una alta eficiencia en la identificación de SGR. Estos resultados son un primer paso en el estudio más exhaustivo de las poblaciones de SGR en estas regiones, lo que tendrá aplicaciones directas a la comprensión de la formación estelar de alta masa y de la estructura galáctica.

Título original: New perspectives on red supergiants: Stellar properties based on large samples, empirical relations and applications

Publicaciones relacionadas:

González-Fernández, Dorda, Negueruela & Marco, 2015A&A...578A...3G
Dorda, Negueruela, González-Fernández & Tabernero, 2016A&A...592A..16D
Dorda, González-Fernández & Negueruela, 2016A&A...595A.105D

Señales de evolución secular en galaxias de disco

Autor: Simón Díaz García
(simondiazgar@gmail.com)
Tesis doctoral dirigida por: Heikki Salo y Eija Laurikainen
Centro: Oulun yliopisto (Universidad de Oulu)
Fecha de lectura: 30 de Septiembre de 2016

En esta tesis doctoral, que incluye 5 artículos científicos publicados en A&A y MNRAS, estudiamos la formación y evolución de las galaxias de disco, que frecuentemente albergan barras estelares en sus partes centrales (2/3 de los casos aproximadamente). En particular, analizamos la evolución secular (lenta) causada por las barras, es decir, la paulatina redistribución de estrellas y gas a lo largo del disco inducida por los torques gravitacionales y las resonancias asociados a las barras. También caracterizamos la distribución de masa de los discos en la muestra *Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies* (S^{4}G, Sheth et al. 2010), que incluye fotometría en el infrarrojo cercano obtenida con el telescopio espacial *Spitzer*, y estudiamos las propiedades de los distintos componentes estelares.

En Díaz-García et al. (2016a) (Paper I) y Herrera-Endoqui et al. (2015) (Paper II) usamos fotometría en 3.6 μm de $\sim$1300 galaxias de disco de baja inclinación ($\leq 65^{o}$). Analizamos la frecuencia, dimensiones, orientaciones y formas de las barras estelares, brazos espirales, anillos, lentes interiores, exteriores y de anillo, y *barlenses* o lentes de barra (estructuras con forma de lente incrustadas en las barras). Calculamos la fuerza de las barras mediante ajuste de elipses, descomposición de Fourier de las imágenes de las galaxias, y usando el cociente de fuerzas gravitacionales tangenciales sobre radiales.

En Díaz-García et al. (2016b) (Paper V) calculamos el perfil radial desproyectado de densidad estelar medio (1-D), el componente medio de disco (+bulbo) de la curva de rotación, y obtuvimos barras medias (2-D, ver Imagen 1) en función de parámetros fundamentales de las galaxias en S^{4}G (por ejemplo, la masa estelar total).

Complementamos nuestro estudio con datos espectroscópicos de campo integral para una sub-muestra de 16 galaxias (S^{4}G) barradas (Seidel et al. 2015, Paper III). Con los datos cinemáticos, cuantificamos la fuerza de la perturbación causada por las barras en el disco gaseoso y estelar, y mostramos que coincide con la fuerza de la barra obtenida directamente de las imágenes fotométricas. En esta tesis también utilizamos observaciones Fabry-Perot en Hα para 29 galaxias S^{4}G de disco (Erroz-Ferrer et al. 2016, Paper IV), y confirmamos que el gradiente interior de velocidad está correlacionado con el brillo superficial central, mostrando una fuerte conexión entre la densidad interior del pozo gravitatorio y la densidad estelar. Además, vimos que las regiones centrales de las galaxias de disco parecen estar dominadas por la materia bariónica (gas y estrellas).

En esta tesis demostramos que la cantidad de materia oscura dentro del disco óptico, estimada con amplitudes máximas de hidrógeno atómico neutro (HI), escala con la masa estelar total tal y como se observa en las simulaciones cosmológicas ΛCDM (ejemplo, Moster et al. 2010). De media, la cantidad de materia oscura dentro del disco óptico es un $\sim$4 % de la del halo total. Hallamos una posible evidencia observacional para el crecimiento de las barras en un *tiempo de Hubble*. Observamos que la fuerza y la longitud de las barras están fuertemente correlacionados, coincidiendo con la evolución seguida por las barras en simulaciones de N-cuerpos (ejemplo, Martínez-Valpuesta et al. 2006). Nuestras observaciones también refuerzan la idea de que los bulbos de tipo Boxy/Peanut observados de cara (perspectiva *face-on*) se manifiestan como lentes de barra (*barlenses*, Laurikainen et al. 2013) - las cuales son frecuentemente detectadas en galaxias de tipo temprano que albergan barras fuertes - y también como lentes interiores.

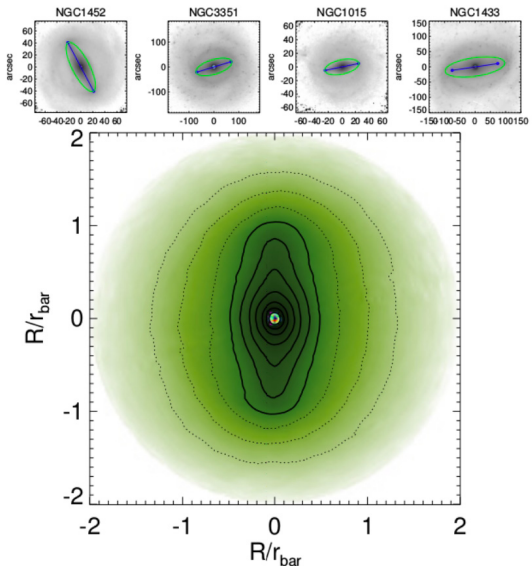
Encontramos una clara evidencia observacional del papel de las barras causando el crecimiento del disco y el incremento de la concentración de estrellas en las partes centrales de las galaxias, tal y como se observa en distintas simulaciones (ejemplo, Sellwood & Wilkinson 1993, Athanassoula & Misiriotis 2002, Minchev & Famaey 2010). Esto fue demostrado comparando el perfil radial de densidad estelar medio de galaxias barradas y no barradas, y con la proporcionalidad entre el aplanamiento de la velocidad de dispersión en las partes externas del disco y la fuerza de la barra.

Demostramos que los discos y las barras en galaxias de tipo temprano (tipo morfológico $T < 5 \equiv Sc$) y tipo tardío ($T \geq 5$), o con masas estelares totales mayores o menores que 10^{10} veces la masa solar, están caracterizados por propiedades muy distintas. Los discos en tipos tardíos tienen menores concentraciones centrales de masa (muchas de estas galaxias no poseen bulbo) y presenta halos de materia oscura más masivos, lo cual afecta las propiedades de estabilidad del disco. La detección de barras en tipos tardíos es altamente dependiente del criterio de identificación.

De media, las barras en las galaxias espirales tempranas ($T = 0-2$) son más largas y tiene mayores amplitudes de densidad que los tipos intermedios ($T \approx 5$), y la longitud de las barras en lo tipos más tardíos del S^{4}G es también mayor. Además, las barras en los tipos tardíos presentan mayores cocientes de fuerza tangencial sobre radial (es decir, mayores torques gravitacionales), incluso cuando el halo de materia oscura es incluido en el cálculo.

Link a la tesis:
http://cc.oulu.fi/~sdiazgar/THESIS_2016/thesis_simon_diazgarcia_5sep2016.pdf

Barra estelar media obtenida reorientando y promediando las imágenes de 38 galaxias SB con tipos morfológicos $-1 \leq T \leq 1$. Algunas de las galaxias del S^{4}G utilizadas se muestran en los paneles superiores, junto con la longitud y el ángulo de posición de sus barras.



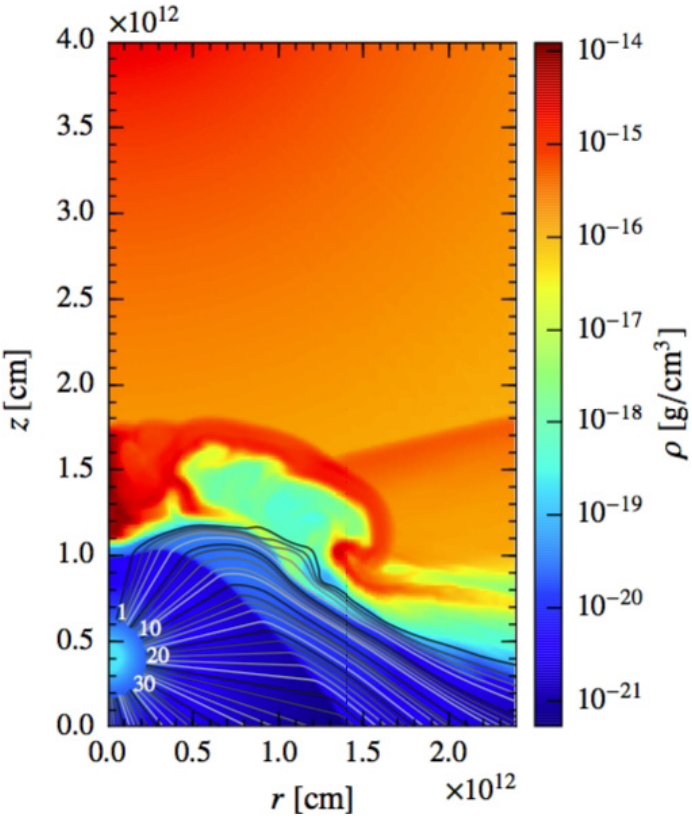
Estudio observacional y teórico de la interacción de vientos relativistas de pulsars jóvenes con vientos estelares inhomogéneos

Autor: Xavier Paredes-Fortuny
(xparedesfortuny@gmail.com)
Tesis doctoral dirigida por: Marc Ribó y Valentí Bosch-Ramón
Centro: Universitat de Barcelona
Fecha de lectura: 17 de Octubre de 2016

Las estrellas binarias de rayos gamma son sistemas que contienen un objeto compacto orbitando a una estrella compañera y que muestran el máximo de emisión no térmico en rayos gamma. Actualmente conocemos 5 estrellas binarias de rayos gamma. Todas ellas contienen un estrella de tipo temprano y un objeto compacto de naturaleza desconocida, ya sea un agujero negro o una estrella de neutrones, excepto para una de ellas, dónde se han detectado pulsaciones radio.

La emisión óptica de las binarias gamma es producida por la estrella y su entorno. Si la estrella óptica es una estrella Be, entonces presenta un disco circumestelar, siendo su tamaño trazado por la anchura equivalente de la línea H-alfa. Simulaciones numéricas de binarias de rayos gamma que contienen una estrella Be, sugieren que el disco circumestelar es perturbado durante el paso por el periastro del objeto compacto, ya sea por las fuerzas de marea y/o el viento del púlsar. La contribución del disco circumestelar en la fotometría óptica representa una importante fracción de la emisión total. El flujo fotométrico observado es proporcional al área proyectada del disco emisor. Por lo tanto, cualquier variabilidad en las curvas de luz puede ser asociada a cambios en el disco circumestelar. Hemos llevado a cabo observaciones ópticas de la estrella binaria de rayos gamma LS I +61 303 con el objetivo de encontrar la variabilidad óptica superorbital ya observada en otras longitudes de onda.

Hemos obtenido los siguientes resultados observacionales: 1) La fotometría óptica y la anchura equivalente de la línea H-alfa presentan una variabilidad superorbital de la fase orbital del máximo tal y como se observa en radio y rayos X, proporcionando una prueba del acoplamiento en los procesos de emisión entre la emisión térmica y no térmica. 2) Las observaciones ópticas presentan una variabilidad superorbital del flujo compatible con el periodo superorbital de 1667 días. 3) Esta variabilidad superorbital es atenuada o ausente en algunas fases orbitales. 4) La variabilidad orbital en el contexto multilongitud de onda presenta retrasos que pueden ser explicados considerando diferentes regiones de emisión. 5) Las observaciones parecen ser solo compatibles con un disco circumestelar extendido y quasi-coplanar. 6) Las observaciones son compatibles con el escenario de onda de densidad y con un modelo muy restrictivo de precesión del disco.



Simulación RHD de la interacción del viento relativista del púlsar (situado en la parte inferior de la figura) con el viento inhomogéneo de la estrella (situada en la parte superior, fuera de la figura).

Las binarias de rayos gamma que contienen una estrella masiva y un púlsar joven que no acreta materia, presentan fuertes interacciones entre los vientos relativistas del púlsar y los de la estrella compañera, resultando en una eficiente aceleración de partículas y en la producción de radiación no térmica, desde radio a rayos gamma. El estudio dinámico de la interacción entre los dos vientos puede ser llevado a cabo mediante simulaciones numéricas, permitiendo estas el análisis radiativo cualitativo del sistema. Además, la región de interacción de los dos vientos puede padecer el impacto de inhomogeneidades del viento estelar, siendo su evolución dinámica y su radiación emitida muy compleja. Hemos llevado a cabo simulaciones RHD de la interacción del viento relativista del púlsar con un viento estelar inhomogéneo (ver Figura), con el objetivo de proporcionar un escenario plausible para explicar la variabilidad en alta energía observada en binarias de rayos gamma.

De las simulaciones hemos obtenido los siguientes resultados: 1) La región de interacción de vientos es muy inestable y sensible a cualquier perturbación, conduciendo al crecimiento de inestabilidades de Rayleigh-Taylor (RT) y Kelvin-Helmholtz (KH). 2) La llegada de inhomogeneidades puede tener un fuerte impacto en toda la región de interacción, afectando también a la emisión no térmica. 3) Las inhomogeneidades dan lugar a inestabilidades de RT/KH que producen una variabilidad muy rápida en la región chocada del púlsar. Esto puede producir una fuerte variabilidad en escalas temporales cortas en la radiación no térmica en estrellas binarias de rayos gamma.

De discos circunestelares a sistemas planetarios: observación y modelización de discos protoplanetarios

Autor: Enrique Macías Quevedo (emacias@bu.edu)
Tesis doctoral dirigida por: Guillem Anglada y Mayra Osorio
Centro: Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC) / Universidad de Granada
Fecha de lectura: 28 de Octubre de 2016

En esta tesis se presentan los resultados de un estudio con alta resolución angular de las primeras etapas de formación planetaria en discos de acreción en torno a estrellas jóvenes. Reportamos observaciones en longitudes de onda milimétricas y centimétricas de los discos de transición alrededor de estrellas (HD169142, XZ Tau B y GM Aur) con masas entre ~0.4 y ~2 $M_{\odot}$ y edades entre ~1 y ~10 millones de años. Estas observaciones, obtenidas con los radiointerferómetros *Very Large Array* (VLA) y *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA), nos han permitido estudiar la emisión térmica de los granos de polvo de mayor tamaño (mm-cm), así como la emisión libre-libre emitida por gas ionizado en el disco y sus alrededores. Además, hemos complementado estas observaciones con la modelización de la emisión térmica de polvo, utilizando para ello códigos de transporte radiativo para discos de acreción irradiados por una estrella central, que calculan de manera autoconsistente su distribución de temperatura y densidad, así como la emisión resultante. Nuestros resultados han contribuido a la mejor caracterización de discos en los que la formación planetaria está empezando.

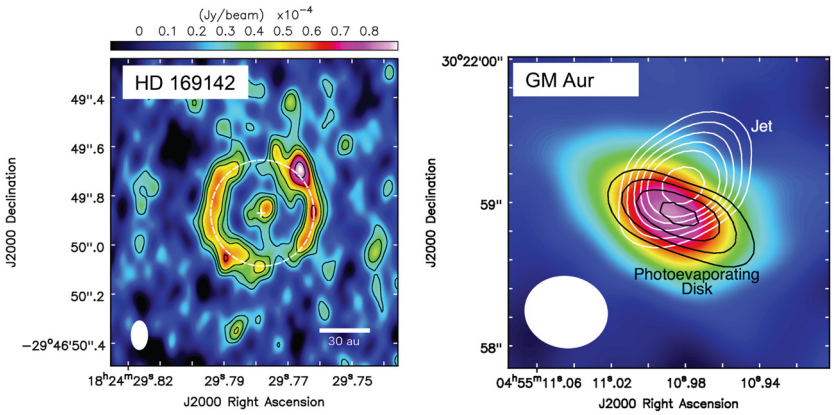
Nuestro estudio de la estrella de masa intermedia HD 169142 ha revelado que el disco presenta un alto grado de subestructura y hasta tres huecos anulares en su distribución de polvo. Proponemos que estas estructuras están siendo creadas tanto por la interacción del disco con múltiples planetas en formación, como por la congelación de gases volátiles sobre los granos de polvo, siendo una de las primeras veces que se ven ambos efectos en un disco a longitudes de onda tan largas como 7 mm. Asimismo, nuestras observaciones detectan una componente de emisión a 7 mm y 9 mm dentro del hueco más interno. Su densidad de flujo e índice espectral indican que la mayor parte de la emisión es producida por gas ionizado. Este gas podría estar asociado con la fotoionización de un disco interno, con un objeto independiente, o con un jet ionizado.

Por otro lado, reportamos el descubrimiento de un disco protoplanetario enano alrededor de la estrella XZ Tau B que muestra todas las características de un disco de transición clásico, pero a una escala de tamaño muchísimo menor. Mientras que el radio de los discos de transición clásicos es de ~100 ua, el disco alrededor de XZ Tau B presenta un radio de tan solo ~3.4 ua, con una cavidad central de ~1.3 ua de radio. Nuestras observaciones y posterior modelado demuestran que este tipo de discos de tamaños extremadamente pequeños también son capaces de formar sistemas planetarios. Debido al pequeño tamaño del disco, su evolución dinámica se espera que sea mucho más rápida que en los discos clásicos. Esto abre la posibilidad de poder seguir la evolución del sistema con nuevas observaciones en un futuro cercano.

Finalmente, nuestras observaciones de la estrella GM Aur nos han permitido obtener imágenes y separar, por primera vez, los componentes principales de los discos en este estado evolutivo: el disco de polvo, el *radiojet* ionizado perpendicular a este y el viento de fotoevaporación originado en la superficie del disco. Nuestros resultados sugieren que los discos de transición son capaces de producir eyecciones colimadas de material siguiendo, aparentemente, los mismos procesos físicos que las protoestrellas más jóvenes. Además, obtenemos que la radiación en el ultravioleta extremo (EUV; 13.6–100 eV) es el mecanismo de ionización principal del viento de fotoevaporación trazado por la emisión libre-libre. No obstante, la tasa de fotones EUV requerida para producir la emisión observada sería insuficiente para producir la tasa de pérdida de masa necesaria para dispersar el disco en la escala de tiempo impuesta por las observaciones (~10 millones de años).

El trabajo presentado en esta tesis ha abierto varias líneas de investigación futuras. Entre ellas, se encuentra estudiar el crecimiento y evolución de los granos de polvo, ya que estos son las piezas que formarán los sistemas planetarios. Para ello, esta tesis muestra que la combinación de observaciones obtenidas con ALMA y con el VLA será de gran utilidad, puesto que permitirá medir la distribución del tamaño máximo de los granos de polvo en el disco. Por otro lado, nuestras observaciones han desvelado que puede existir una población de discos muy pequeños que podrían ser los precursores de los sistemas planetarios compactos en torno a estrellas enanas, inicialmente identificados en misiones como Kepler, y entre los que se encontrarían los de Proxima Centauri o Trappist-1. Además, esta tesis ha demostrado que es posible estudiar la dispersión y fotoevaporación del gas en discos protoplanetarios mediante observaciones radiointerferométricas. El estudio de este proceso será de gran relevancia ya que impone límites importantes a la escala de tiempo y a la cantidad de material disponible para formar los futuros sistemas planetarios.

Tesis disponible en: http://hdl.handle.net/10481/44570



Izquierda: Imagen de la emisión a 7 mm del disco de HD 169142. La emisión muestra un anillo asimétrico, asociado con emisión de polvo proveniente del disco, así como una fuente central de emisión libre-libre, producida por gas ionizado cercano a la estrella. Derecha: Superposición de nuestras observaciones de GM Aur. En colores se muestra la emisión a 7 mm asociada con el disco protoplanetario. En contornos se muestra la emisión libre-libre a 3 cm separada en dos componentes: una con la misma morfología que el disco de polvo, asociada con el disco fotoevaporativo; y otra perpendicular al disco, asociada con un *radio jet*.

Trazando la evolución química temprana de galaxias enanas del Grupo Local usando estrellas RR Lyrae

Autora: Clara E. Martínez Vázquez
(cmartinez@iac.es)
Tesis doctoral dirigida por: Matteo Monelli, Carme Gallart y Edouard J. Bernard
Centro: Universidad de La Laguna / Instituto de Astrofísica de Canarias
Fecha de lectura: 16 de Noviembre de 2016

La formación y evolución de las galaxias es una de las áreas de investigación más activas de la Astrofísica moderna. Las poblaciones estelares resueltas ofrecen la posibilidad de estudiar las galaxias cercanas a través de sus estrellas individuales, proporcionando de esta manera un gran número de observables y restricciones a los modelos, que son fundamentales para entender los mecanismos físicos responsables de su evolución. En este contexto, las estrellas de tipo RR Lyrae son trazadores muy potentes de la evolución temprana de los sistemas estelares donde se encuentran, porque aportan información directa sobre la edad y la composición química de la población estelar a la que pertenecen (>10 Giga-años).

El objetivo más importante de este trabajo de tesis es el estudio de la evolución temprana de una muestra de galaxias enanas del Grupo Local, a través de las poblaciones de estrellas variables. En particular, esta investigación se centra en siete galaxias esferoidales enanas: Sculptor, satélite de la Vía Láctea, y seis compañeras de M31 (And I, II, III, XV, XVI y XXVIII).

Este trabajo aporta el catálogo más completo de estrellas variables en la galaxia de Sculptor, gracias a la fotometría multibanda *BVI* que abarca un lapso de tiempo de ~ 23 años y cubre una fracción significativa del cuerpo de la galaxia (~ 2.5 deg^2). La muestra de 536 RR Lyrae nos permitió trazar en detalle la evolución química temprana de esta galaxia. Hemos encontrado que la metalicidad de las RR Lyrae cubre un amplio rango de valores, consistente con un enriquecimiento ocurrido en las épocas tempranas de la vida de la galaxia. Hemos comprobado que existe una correlación entre las propiedades pulsacionales y fotométricas de las estrellas RR Lyrae, siendo las más brillantes las más pobres en metales, en promedio, y las que se distribuyen cerca de la región Oosterhoff-II en el diagrama periodo-amplitud. Hemos encontrado que el *ratio* entre estrellas más ricas y menos ricas en metales cambia en función de la distancia al centro de Sculptor, en acuerdo con el cambio de morfología de la rama horizontal. Esto prueba que el gradiente de metalicidad ya existía en épocas muy tempranas.

Las seis galaxias de M31 fueron estudiadas en el marco del proyecto *ISLAndS* (*Initial Star formation and Lifetimes of Andromeda Satellites*, por sus siglas en inglés). Los datos fueron obtenidos por el Telescopio Espacial Hubble durante 111 órbitas. El objetivo principal de este proyecto consiste en derivar historias de formación estelar precisas de las galaxias observadas para verificar si existen diferencias entre las galaxias satélites de la Vía Láctea y las de M31. Estos datos nos permitieron aumentar el número de variables (la mayoría estrellas RR Lyrae) en And I, II y III, y obtener los primeros descubrimientos de estrellas variables en And XV, XVI y XXVIII. En total 871 estrellas RR Lyrae fueron analizadas.

Para las siete galaxias, obtuvimos medidas individuales de las metalicidades de las estrellas RR Lyrae, pudiendo proporcionar así su distribución de metalicidad. Con ellas encontramos fuertes evidencias de que existe un rango de metalicidades en la población de las RR Lyrae para todas las galaxias (con excepción de And III y la galaxia poco masiva And XVI). Por otro lado, hemos obtenido la distancia de estas galaxias usando diferentes métodos basados en las RR Lyrae y la parte alta de las estrellas gigantes rojas.

Finalmente, hemos usado datos disponibles en la literatura de 41 galaxias localizadas en diferentes entornos del Grupo Local para comparar las propiedades de su población vieja. Hemos comprobado así que las galaxias satélites de M31 parecen tener una morfología más roja de la rama horizontal (concretamente en las regiones centrales). Sin embargo, no detectamos diferencias en el comportamiento de las estrellas RR Lyrae en las galaxias satélites de la Vía Láctea, en las de M31 o en las galaxias más aisladas. Por otra parte, hemos demostrado que la anchura de la rama horizontal en la banda *V* (medida a través de las RR Lyrae) está correlacionada con la metalicidad media de la galaxia y con la sigma de la distribución de metalicidad de las estrellas RR Lyrae. Esto apoya la hipótesis de que las galaxias más masivas experimentan un enriquecimiento químico, lo suficientemente rápido en épocas tempranas, como para quedar registrado en las propiedades pulsacionales de sus estrellas RR Lyrae.

Búsqueda por imagen directa y caracterización de enanas marrones y planetas masivos alrededor de estrellas

Autor: Bartosz Gauza (bgauza87@gmail.com)
Tesis doctoral dirigida por: Rafael Rebolo López y Víctor Javier Sánchez Béjar
Centro: Universidad de La Laguna / Instituto de Astrofísica de Canarias
Fecha de lectura: 4 de Noviembre de 2016

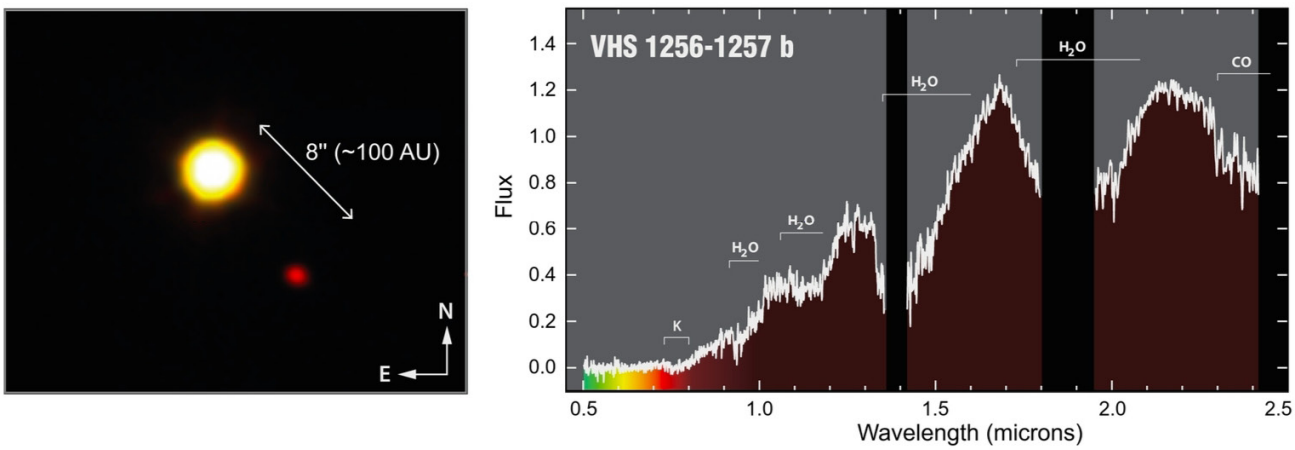
Las enanas marrones y los planetas masivos detectados por imagen directa alrededor de estrellas consitituyen un grupo importante para los estudios de objetos subestelares y sus propiedades físicas. Podemos inferir las distancias y metalicidades de los compañeros a partir de sus estrellas primarias, más brillantes y, por lo tanto, más fácilmente caracterizables. Y aún más importante, podemos restringir las edades de estos sistemas, lo que permite superar la degeneración intrínseca con la edad entre masas, temperaturas y luminosidades de los objetos con masas por debajo del límite de la quema del hidrógeno.

El objetivo de esta tesis es identificar y caracterizar las estrellas de muy baja masa, enanas marrones y planetas masivos como compañeros de estrellas. Para lograr este objetivo llevamos a cabo dos búsquedas distintas, basadas en la imagen directa de estos objetos en el infrarrojo cercano y medio. En primer lugar, realizamos una búsqueda de compañeros con movimiento propio común, situados a gran separación alrededor de estrellas de alto movimiento propio, utilizando datos en el infrarrojo cercano del VISTA *Hemisphere Survey* (VHS). En segundo lugar, hemos realizado un programa de imagen profunda y con alta resolución espacial, en el infrarrojo medio en la ventana de 10 micras (8.7 μm). Para ello, empleando el instrumento CanariCam en el Gran Telescopio Canarias, hemos obtenido imágenes de las estrellas más cercanas del hemisferio norte, dentro de 5 pc del Sol, con el fin de detectar compañeros subestelares de temperaturas efectivas hasta 600 K, y localizados en separaciones angulares entre 1-10", correspondientes a separaciones orbitales proyectadas desde 2 hasta 50 UA.

Nuestra búsqueda realizada utilizando datos del VHS incluye datos obtenidos hasta marzo del 2013 y cubre aproximadamente 8500 grados cuadrados del cielo del hemisferio sur en las bandas J y Ks . Con la fotometría y astrometría de las fuentes VHS proporcionadas en el catálogo, efectuamos una correlación cruzada con el catálogo de 2MASS, para buscar objetos con movimientos propios μ > 0.15-0.20 arcsec/yr. A continuación se utilizó esta lista para identificar sistemas multiples con movimiento propio común, concentrándonos en aquellos que contienen componentes potencialmente de muy baja masa, de tipos espectrales M y más tardíos. Para los candidatos seleccionados hemos obtenido espectroscopia de baja resolución en el óptico y infrarrojo cercano, lo que nos permitió clasificar sus tipos espectrales y estimar distancias espectrofotométricas. Con la información astrométrica, fotométrica y espectroscópica disponible, es decir, movimientos propios, separaciones angulares y distancias espectrofotométricas, hemos sido capaces de verificar la bondad de los candidatos a compañeros seleccionados. En total, hemos confirmado 30 nuevos sistemas con movimiento propio común - 27 sistemas binarios y 3 sistemas triples - que incluyen en total unos 35 compañeros de tipo M previamente desconocidos o no reconocidos como compañeros (10 de tipos M7-M9), 6 enanas de tipo L y 2 enanas de tipo T. Nuestros resultados de VHS aumentan el número de compañeros ultrafríos conocidos a gran separación (a > 50 UA) en un 26% y aumentan el número de compañeros tipo L en el mismo rango de separaciones en un 13%.

Entre estos compañeros identificados algunos constituyen casos particularmente interesantes. Hemos encontrado un componente adicional de tipo L en el sistema triple moderadamente pobre en metales HD 221356 (VHS J2331-0405), conocido anteriormente por estar formado por una estrella F8V pobre de metales, y una pareja M8V + L3V a gran separación. Utilizando modelos de evolución la masa del nuevo compañero se estimó en 0.08 M_{Sol}, lo que sitúa el objeto cerca de la frontera estelar-subestelar. Este sistema múltiple proporciona un interesante grupo de objetos con masas ligeramente por encima y por debajo del límite de masa de quema del hidrógeno. Hemos descubierto y caracterizado un compañero L tardío extremadamente rojo (*J* - *Ks* = 2.47 mag) a 8.06 arcsec (~102 UA) de separación de una enana M7.5 previamente no conocida VHS J1256-1257. Encontramos que este sistema es joven,

Ejemplo de uno de los sistemas de movimiento propio común, VHS 1256-1257, identificado y caracterizado a lo largo de la tesis. Izq.: Imagen en falso color combinando las bandas YJKs de la primaria, enana joven tipo M, con su compañero de masa planetaria a separación de 102 UA. Der.: Espectro de baja resolución en el óptico y el infrarrojo cercano, de VHS 1256-1257b obtenido con OSIRIS/GTC y SofI/NTT. Las principales características espectrales están indicadas.



con una edad entre 150 y 300 Myr y localizado a una distancia de 12.7 pc. Para la primaria inferimos una masa de 73 (+20, -15) MJup, en el límite entre estrellas y enanas marrones, y una temperatura efectiva de 2620 ± 140 K. Para el compañero hemos determinado una masa de 11.2 (+9.7, -1.8) M_{Jup}, colocándolo en el régimen de masa planetaria, y Teff de unos 880 (+140, -110) K. Cada uno de los nuevos compañeros descubiertos, a través de los parámetros que pueden ser determinados de sus primarias, puede servir como un punto de referencia para los estudios de las propiedades físicas de las estrellas de muy baja masa y objetos subestelares.

Utilizando el instrumento CanariCam en el Gran Telescopio Canarias de 10.4 m de diametro, hemos observado los 25 sistemas más cercanos dentro de 5 pc del Sol, llegando a un límite de detección en promedio de 11.3 ± 0.2 mag (1.5 mJy) en el filtro Si-2 de 8.7 μm, en el rango de separaciones angulares de 1 a 10 segundos de arco. Esto nos permite detectar, o restringir la presencia de compañeros subestelares situados a separaciones orbitales proyectadas entre ∼2 y 50 UA para nuestra muestra, con temperaturas efectivas de hasta 600 K y masas mayor de 30 M_{Jup}, asumiendo una edad media de 5 Ga. No hemos confirmado ningún compañero nuevo alrededor de estas estrellas. Sin embargo, a partir de las no-detecciones, hemos podido determinar límites superiores a la tasa de ocurrencia de tales compañeros, a distancias orbitales todavía inexploradas por las búsquedas previas de imagen directa. Dado que nuestra muestra estaba compuesta principalmente de las enanas M, la estimación de frequencia de compañeros se aplica principalmente a estas estrellas poco masivas. Encontramos, con un nivel de confianza de 90%, que menos del 10% de estas estrellas tiene compañeros de tipo L y compañeros subestelares de tipo T con $m \geq 30$ MJup y $T_{eff} \geq 600$ K a separaciones orbitales proyectadas de $\sim 3.5 – 35$ UA. Hemos mejorado las restricciones a la presencia de compañeros alrededor de la estrella de Barnard, alcanzando un límite de detección de objetos hasta ∼15 M_{Jup} y temperaturas efectivas por encima de 400 K, a separaciones orbitales proyectadas desde 1.8 hasta 18 UA ($P_{orb} > 12$ años), que no se han explorado todavía con técnicas de velocidad radial o astrometría.

Considerando resultados de VHS y CanariCam en conjunto, ambas búsquedas indican que los compañeros enanas marrones y planetas gigantes alrededor de estrellas, en particular entorno a estrellas de baja masa tipo M, son poco frequentes tanto en orbitas de gran separación ($> 50 – 100$ UA) como en orbitas cercanas por debajo de 35 UA.

Diseño CMOS de sistemas de *front-end* para instrumentación ambiental en Marte

Autor: Samuel Sordo Ibáñez (ssordo@iac.es)
Tesis doctoral dirigida por: Servando Espejo Meana
Centro: Universidad de Sevilla
Fecha de lectura: 15 de Diciembre de 2016

En esta tesis doctoral se presenta el diseño de un magnetómetro 3D digital para medir la dirección e intensidad del campo magnético en la superficie de Marte, dentro del marco de la misión *Mars MetNet Precursor*. Los estrictos requisitos de esta misión, en términos de costes, masa, volumen y potencia, implicaron la necesidad de proporcionar una solución compacta y de bajo coste.

Es por ello que la tesis propone un diseño basado en sensores de magneto-resistencia anisotrópica (AMR) como alternativa más eficiente al empleo tradicional de sensores *fluxgate*, en combinación con un circuito integrado de señal mixta (ASIC) para la implementación de la electrónica de *front-end*. El ASIC ha sido diseñado en una tecnología CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) estándar, también como solución más compacta al empleo de electrónica discreta, y además más barata y con mejores prestaciones con respecto a los procesos tecnológicos específicos para espacio.

Dado que las tecnologías CMOS estándar no están acondicionadas para operar en entornos extremos como el espacio, principalmente en lo relativo a la radiación y la temperatura, fue necesario proponer técnicas de robustecimiento como parte del diseño del ASIC, con objeto de asegurar la fiabilidad y estabilidad en las prestaciones del instrumento durante todo su ciclo de vida útil. Otros retos añadidos estuvieron asociados al diseño de una arquitectura que optimizara las prestaciones de los sensores AMR, principalmente en términos de linealidad y estabilidad con la temperatura, junto con la implementación *on-chip* de sistemas para la calibración del instrumento, para la monitorización de gradientes térmicos, y también para la detección de errores.

Los resultados experimentales de la cualificación para espacio permiten confirmar la eficiencia de las técnicas propuestas en el ASIC para un rango extendido de temperaturas de operación, exhibiendo una robustez frente a la radiación por encima de 320 krad, y con una tasa de error estimada de 0.1 errores/año.

Las técnicas y los diseños propuestos en este trabajo de tesis también han sido aplicados con éxito en la electrónica integrada de los sensores de viento del instrumento MEDA, a bordo del Rover de la misión Mars 2020 de la NASA, así como en el instrumento SIS de la misión ExoMars.

Tesis disponible en:

https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/52295/TESIS_SORDO.pdf

Antenas de ALMA al atardecer.
Créditos: H. Boffin (ESO)/ALMA (ESO/NAOJ/NRAO).

Sociedad Española de Astronomía

Universidad de Barcelona,
Facultad de Física
Av. Martí Franquès, 1
Barcelona 08028

Tfno: +34 91 394 5249
Fax: +34 91 394 5051