



Panorámica del proyecto CLASSy. The CARMA Large Area Star Formation Survey.

M. Fernández-López^{1,2}, H.G. Arce³, L. Looney², L.G. Mundy⁴, S. Storm⁴, K.I. Lee⁴, P. Teuben⁴ & G. CLASSy⁵

¹ Instituto Argentino de Radioastronomía, CCT-La Plata (CONICET), C.C.5, 1894, Villa Elisa, Argentina

² Department of Astronomy, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1002 West Green Street, Urbana, IL 61801, USA

³ Department of Astronomy, Yale University, P.O. Box 208101, New Haven, CT 06520-8101, USA

⁴ Department of Astronomy, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA

⁵ <http://carma.astro.umd.edu/classy/team.html>

Contacto/ MFL: manferna@gmail.com

Resumen / El proyecto “CARMA Large Area Star Formation Survey” (CLASSy) consiste en un mapeo de 5 campos que cubren unos 100 arcominutos cuadrados cada uno en las nubes moleculares de Perseus (3 campos) y Serpens (2 campos). CLASSy está basado en observaciones interferométricas en ondas milimétricas de alta resolución angular ($7''$), que son sensibles a estructuras de escalas espaciales que van desde los 1000 AU hasta los 3 pc. En particular, el análisis de la emisión molecular de $N_2H^+(1-0)$ de las estructuras filamentosarias encontradas en estas regiones de formación estelar, impone restricciones a los modelos teóricos que tratan de explicar su origen y evolución. Las observaciones cinemáticas del gas muestran gradientes de velocidad que sugieren alternativas para entender cómo se forman los filamentos. Por otra parte, a partir del análisis cinemático de estos datos, se han llevado a cabo estudios pioneros de la turbulencia en estas nubes.

Abstract / The “CARMA Large Area Star-formation Survey” (CLASSy) is a CARMA Key Project which is mapping 5 fields covering about 150 square-arcminutes each in the Perseus (3 fields) and Serpens (2 fields) Molecular Clouds. CLASSy consists of 3 mm interferometric observations with angular resolution $\theta \sim 7''$, being sensitive to spatial scales between 1000 AU to 3 pc. Particularly, the analysis of the $N_2H^+(1-0)$ molecular emission from the filamentary structures found in these star-forming regions constrain theoretical models explaining their origin and evolution. Gas kinematics observations show velocity gradients that suggest possible explanations on how filaments are formed. In addition, from the analysis of the kinematics we carried out a pioneer study of the turbulence in these clouds.

Keywords / ISM: clouds — ISM: kinematics and dynamics — ISM: structure — stars: formation

1. Introducción

Los procesos de formación estelar se extienden a través de un gran rango de escalas espaciales y de densidad. La mayor parte del gas que conforma las nubes moleculares, que se extienden por decenas de parsecs, es gas poco denso ($10^2 - 10^3 \text{ cm}^{-3}$). Dicho gas forma en su interior estructuras con tamaños de parsecs algo más densas, que adoptan por lo general una morfología filamentosaria. Gracias a exploraciones como la realizada por el satélite *Herschel* (e.g. André et al., 2010), ahora sabemos que las nubes moleculares forman redes de filamentos y que dentro de estos filamentos se forman núcleos con tamaños de unos 0.01-0.1 pc, con una densidad suficiente ($n > 10^5 \text{ cm}^{-3}$) como para comenzar el colapso gravitatorio que finalmente origina las estrellas, a veces aisladas, a veces formando parte de pequeños grupos y en ocasiones, formando grandes cúmulos. A pesar del conocimiento adquirido acerca de todos estos objetos del medio interestelar, las cuestiones relativas a su origen y evolución aún

no se comprenden por completo. El proyecto CLASSy (Storm et al., 2014) tiene así como objetivo inmediato el estudio de la formación de las estructuras filamentosarias y de su evolución y fragmentación en núcleos aún más densos, que son el germen de nuevos sistemas estelares. Para ello, se hacen necesarias (entre otras) observaciones de la emisión del gas y el polvo y un análisis de las características físicas y cinemáticas de las distintas estructuras de una nube molecular. Los procesos involucrados comprenden entre otros la acción de campos magnéticos, flujos turbulentos supersónicos y de la gravedad, pero se desconoce el papel que cada uno desempeña en las distintas escalas espaciales involucradas, así como en los distintos tipos de nubes moleculares (edad, actividad de formación de estrellas, etc). Para cubrir un amplio rango de escalas espaciales se necesitan observaciones de regiones de parsecs con la resolución angular suficiente como para mostrar detalles de ~ 1000 AU. Además, es necesario cubrir distintas nubes moleculares que muestren diferentes condiciones ambientales. El proyecto CLASSy

pretende ayudar a entender qué procesos controlan la tasa de formación estelar y contestar por qué la Función Inicial de Masa (*IMF*) tiene la forma que tiene y si esta forma depende de las condiciones ambientales de cada nube.

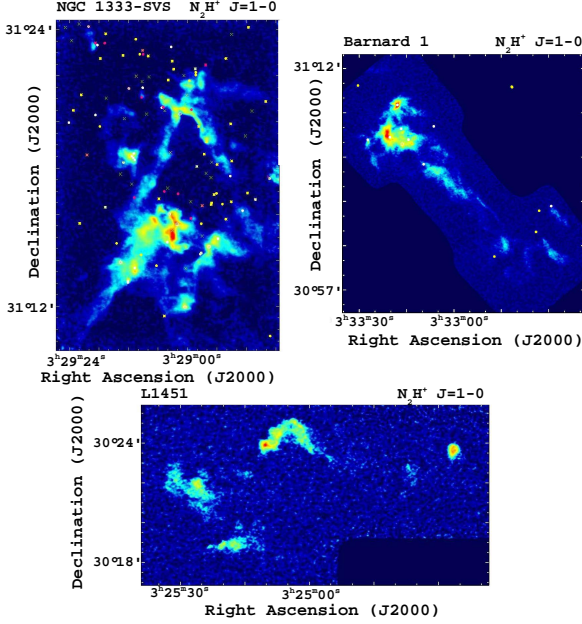


Fig. 1: Emisión integrada de N_2H^+ (1-0) en tres regiones de la nube molecular de Perseus (ver sección 3.1.).

En esta contribución exponemos una panorámica acerca del proyecto CLASSy y mostramos algunos de los primeros resultados obtenidos en el análisis de los datos.

2. Observaciones

Las observaciones de CLASSy se realizaron con el interferómetro milimétrico *Combined Array for Research in Millimeter-wave Astronomy (CARMA)* en cinco extensas regiones de formación estelar con un coste en tiempo de unas 700 horas. Las regiones observadas en la nube molecular de Perseus (distancia 235 pc) son NGC1333 (Mundy, 2014), Barnard 1 (Storm et al., 2014) y L1451 y en la nube molecular de Serpens (distancia 415 pc) son Serpens Main (Lee et al., 2014) y Serpens South (Fernández-López et al., 2014). Tal vez la mayor novedad observacional del proyecto reside en el uso del modo *CARMA23* (que comprende seis antenas de 10.4 m, nueve de 6.1 m y ocho de 3.5 m), que incrementa la capacidad de imagen del telescopio por sobre el modo estándar *CARMA15*. CLASSy explota las posibilidades únicas de *CARMA*, al usar además los datos de las autocorrelaciones de los discos de 10.4 m para obtener información de *zero spacing* (que evitan el filtrado espacial inherente a las observaciones interferométricas) y ejecutar mosaicos rápidos para producir mapas más grandes. En cada una de las cinco regiones se observaron unas 700 posiciones, cubriendo en total unos 700

arcominutos cuadrados con una resolución de unos $7''$. El correlador en el modo *CARMA23* dispone de cuatro bandas espectrales. CLASSy sintoniza tres bandas a la frecuencia de las transiciones $J = 1 \rightarrow 0$ N_2H^+ , HCO^+ y HCN con una resolución espectral de 0.16 km s^{-1} y una cuarta banda ancha para calibración y detección de continuo a 92.8 GHz. Estas tres moléculas trazan diversas condiciones físicas del gas denso dentro de una nube. Con todo, los datos de CLASSy ofrecen una perspectiva del gas a gran escala dentro de la nube molecular, mostrando a la vez el detalle de los núcleos densos en los que se forman nuevas estrellas.

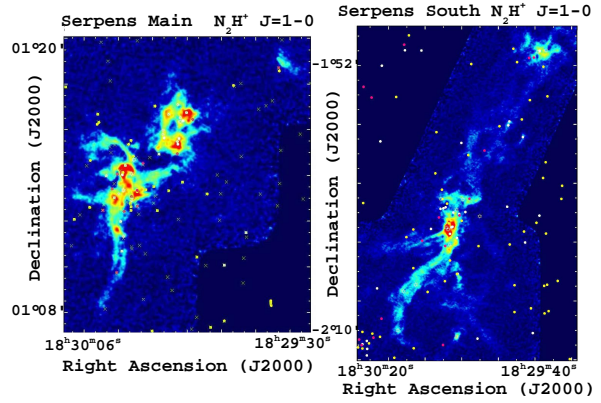


Fig. 2: Emisión integrada de N_2H^+ (1-0) en dos regiones de la nube molecular de Serpens.

3. Resultados

3.1. Mapas moleculares

Las Figs. 1 y 2 muestran los mapas de la emisión integrada de la molécula de N_2H^+ , junto con la distribución de varios tipos de YSOs detectados con Spitzer (Jørgensen et al. 2006; Harvey et al. 2006; Gutermuth et al. 2008) en las cinco regiones observadas por CLASSy. En la Fig. 1, NGC 1333 muestra una gran actividad de formación estelar pasada y actual; B1 (Barnard 1) muestra actividad de formación estelar actual hacia el norte pero no en la parte central o hacia el sur; L1451 es una región en la que no se han detectado YSOs, por lo que se piensa que se encuentra en una fase muy temprana de formación estelar o que su actividad es muy baja. En la Fig. 2, tanto Serpens Main como Serpens South contienen regiones de mayor y menor actividad de formación estelar.

Excepto L1451, todas las regiones muestran una intrincada red de filamentos y regiones más densas en las que se están formando activamente estrellas. A partir de los mapas de emisión integrada hemos podido caracterizar físicamente estos filamentos (morfología de las estructuras, tamaños, densidad columnar, temperatura de excitación, etc) y, comparando los mapas de emisión

integrada de las tres moléculas observadas, hemos detectado cambios en la composición química. Hay por ejemplo estructuras como los flujos moleculares, que se ven en unas y no en otras moléculas (Lee et al., 2014). No obstante, la gran diferencia de nuestros datos con respecto a los que aportan exploraciones como *Herschel* en infrarrojo u observaciones de antena única (e.g., en Serpens South Kirk et al., 2013), es sin duda, la información cinemática unida a la gran resolución angular que proveen los datos espectrales. Para cada región hemos producido mapas del centroide y la dispersión de velocidad ajustando Gaussianas al espectro de cada pixel (Figuras 3 y 4).

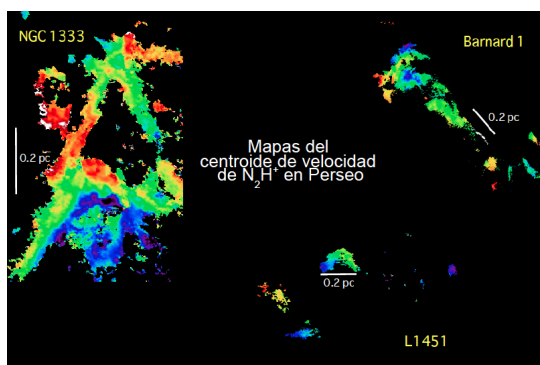


Fig. 3: Centroides de velocidad radial del N_2H^+ (1-0) en tres regiones de la nube molecular de Perseus. La escala de color coincide con material desplazado hacia el azul y el rojo.

3.2. Primeros resultados

A partir del estudio de la emisión de N_2H^+ en Serpens South (Fernández-López et al., 2014) comprobamos que dicha emisión traza la estructura filamentaria del medio interestelar y que la anchura de los filamentos podría ser menor que la anchura medida a partir de la emisión de polvo de los mismos (Arzoumanian et al., 2013). Además, algunos filamentos parecen correr paralelos en algunas porciones, reforzando la idea de que los filamentos podrían estar compuestos por grupos de *fibras* también filamentarias (Hacar et al., 2013). Tal vez lo más importante del estudio en Serpens South sea el descubrimiento de gradientes de velocidad perpendiculares a algunos filamentos. Estos gradientes podrían suponer un indicio para averiguar cómo se forman los filamentos. A este respecto, nuestro grupo está desarrollando simulaciones numéricas indagando un posible mecanismo de formación de filamentos del medio interestelar: la formación de filamentos por el efecto de la gravedad de un gas previamente comprimido por dos flujos convergentes (Chen & Ostriker, 2014).

En el estudio de Barnard 1 (Storm et al., 2014) mostramos el análisis de los datos de N_2H^+ a través de la técnica de dendrogramas no-binarios desarrollada para descomponer espacialmente la emisión del gas denso y explorar la cinemática de las estructuras dentro de las nubes

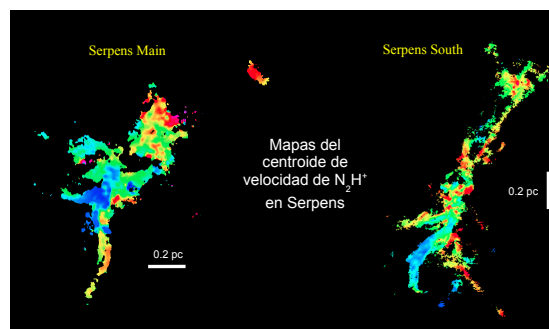


Fig. 4: Centroides de velocidad radial del N_2H^+ (1-0) en dos regiones de la nube molecular de Serpens.

moleculares. Usando las propiedades espacio-cinemáticas de las estructuras identificadas por el dendrograma, pudimos hacer una estimación de la profundidad de Barnard 1: $\sim 0,15$ pc. Esta estimación procede de comparar dos relaciones tamaño vs. ancho de línea: i) una que usa el promedio de la dispersión de velocidades no-térmicas, que es sensible a la profundidad de la nube y ii) otra que usa la variación de la velocidad radial dentro de cada estructura, que es sensible al tamaño proyectado en el plano del cielo de la nube. La técnica de dendrogramas (Houllahan & Scalo, 1992) permite también comparar la turbulencia en nubes diferentes que pueden estar en diferentes fases evolutivas.

En el estudio de Serpens Main (Lee et al., 2014) mostramos, además del análisis de dendrogramas de la nube, la identificación de los filamentos en esta nube. La investigación de las propiedades físicas de estos filamentos sugiere que las diferencias podrían deberse a diferencias evolutivas entre los filamentos. Es más, algunos de estos filamentos, que comparten características similares y son próximos espacialmente, podrían estar asociados, y ser parte de estructuras de mayor tamaño.

Agradecimientos: La construcción de *CARMA* fue apoyada por los estados de California, Illinois y Maryland, las fundaciones J. McDonnell, G. y B. Moore, K. T. y E. L. Norris, la U. de Chicago, CalTech, y NSF. El desarrollo actual de *CARMA* y sus operaciones son financiados por la NSF bajo el acuerdo cooperativo (AST 08-38226) y por el consorcio de universidades de *CARMA*.

Referencias

André P., et al., 2010, *A&A*, 518, L102
 Arzoumanian D., et al., 2013, *A&A*, 553, A119
 Chen C.-Y., Ostriker E. C., 2014, *ApJ*, 785, 69
 Fernández-López M., et al., 2014, *ApJL*, 790, L19
 Gutermuth R. A., et al., 2008, *ApJL*, 673, L151
 Hacar A., et al., 2013, *A&A*, 554, A55
 Harvey P. M., et al., 2006, *ApJ*, 644, 307
 Houllahan P., Scalo J., 1992, *ApJ*, 393, 172
 Jørgensen J. K., et al., 2006, *ApJ*, 645, 1246
 Kirk H., et al., 2013, *ApJ*, 766, 115
 Lee K. I., et al., 2014, *ArXiv e-prints*
 Mundy L. G. e., 2014, in preparation
 Storm S., et al., 2014, *ApJ*, 794, 165