



Estudios interferométricos del campo magnético en regiones de formación estelar.

Observaciones milimétricas con *CARMA*.

M. Fernández López^{1,2}, I. Stephens³, D. Segura-Cox², R. Crutcher², L.W. Looney², W. Kwon⁴

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

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

³ Institute for Astrophysical Research, Boston University, Boston, MA 02215, USA

⁴ SRON Netherlands Institute for Space Research, Landleven 12, 9747 AD Groningen, The Netherlands

Contacto/ MFL: manferna@gmail.com

Resumen / Actualmente, el papel que desempeña el campo magnético en los procesos de formación estelar es aún poco conocido. A pesar de las medidas realizadas usando observaciones de antena única, es necesario un mayor esfuerzo observacional que cubra los distintos objetos en todo el rango evolutivo y con mejor resolución angular. En este sentido, presentamos en esta contribución algunos resultados obtenidos a partir de observaciones polarimétricas realizadas con el interferómetro *CARMA* a 1.25 mm, tanto de continuo como de línea espectral. Los objetos de estudio son dos discos de acreción en torno a protoestrellas de Clase 0 (L1527) y T Tauri (HL Tau) y la región de formación de estrellas masivas W3OH. En los dos discos de acreción hemos podido resolver la estructura morfológica del campo magnético, mientras que en W3OH hemos logrado la primera detección de efecto *Zeeman* realizada con un interferómetro.

Abstract / Currently, the possible role of magnetic fields in star formation processes is not clear. Despite the efforts made through single-dish observations, a stronger observational effort is required in order to broaden the sample of detections and acquire more insight into the morphology of the magnetic field at high-angular resolution scales. Here we present some results obtained from *CARMA* 1.25 mm continuum and spectral line polarization observations. The target of these observations were two accretion disks around a Class 0 (L1527) and a T Tauri (HL Tau) protostar and the massive star-forming region W3OH. We resolved the morphology of the magnetic field in both disks and, in W3OH, we achieved the first *Zeeman* detection ever made with an interferometer.

Keywords / ISM: magnetic fields — stars: protostars — techniques: polarimetric — magnetic fields

1. Introducción

Los estudios y modelos teóricos de formación estelar (tanto los que se refieren a la formación y evolución de las nubes del medio interestelar, como los que se refieren a la formación de las estrellas en sí mismas) han involucrado en mayor o menor grado el efecto del campo magnético.

La distribución espacial del campo magnético es compleja y desconocida en muchos de los objetos del medio interestelar en escalas de menos de $\sim 10^3$ AU; la magnitud del campo magnético ha sido medida directamente sólo en regiones de escalas por encima de las $10^4 - 10^5$ AU. La falta de mediciones observacionales con resolución angular adecuada es un problema a la hora de completar la caracterización empírica de las propiedades del campo magnético en regiones de formación de estrellas tanto de alta como de baja masa.

Numerosos estudios muestran la distribución morfológica del campo magnético en escalas de 10^4 a 10^5 AU (e.g., Girart et al., 2006; Stephens et al., 2013; Hull et al., 2013). Sin embargo, este tipo de observaciones, realizadas con interferómetros que detectan la emisión

polarizada de continuo producida por el polvo en ondas (sub)milimétricas, no ha permitido hasta el momento la detección del campo en discos circunestelares, siendo el único resultado las cotas superiores impuestas a la fracción de polarización (Hughes et al., 2009, 2013). Sólo recientemente se ha logrado la detección y mapeo de la señal polarizada procedente del disco de una protoestrella muy joven, Clase 0 (Rao et al., 2014; Segura-Cox et al., 2014). En discos más evolucionados la polarización continúa sin detectarse.

Por otro lado, para hacer mediciones directas de la magnitud del campo magnético (en la línea de visión) en el medio interestelar hay que acudir a experimentos basados en el efecto *Zeeman*. En su revisión, Crutcher et al. (2009) reporta medidas realizadas fundamentalmente en experimentos de antena única en 27 nubes moleculares. El problema de estas medidas es que la baja resolución angular puede enmascarar inhomogeneidades del campo, por lo que no sirven para caracterizarlo en escalas de menos de 5×10^3 AU.

La presente contribución* da cuenta de algunos traba-

* Algunas figuras relevantes pueden encontrarse en las si-

jos relativos al campo magnético en zonas de formación estelar, que nuestro grupo ha realizado usando el *Combined Array for Research in Millimeter-wave Astronomy (CARMA)*. En particular, la sección 2. trata cuestiones relativas a las observaciones presentadas. La sección 3. describe los principales resultados del estudio polarimétrico en el disco de acreción de HL Tau (Stephens et al., 2014). La sección 4. explica los resultados en el trabajo que realizamos en el disco de la protoestrella Clase 0 L1527 y las principales conclusiones a las que nos llevó su estudio (Segura-Cox et al., 2014). Finalmente, en la sección 5. reportamos la primera detección del efecto *Zeeman* realizada en W3 OH con un interferómetro milimétrico, inaugurando un nuevo tipo de experimentos que podrá ser explotados con *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)*.

2. Polarimetría con *CARMA*

CARMA es un interferómetro heterogéneo que cuenta con 15 antenas para experimentos de polarización: seis con diámetros de 10.4 m y nueve con diámetros de 6.1 m. En total, *CARMA* cuenta con 105 líneas de base diferentes. Ubicado en Cedar Flat, en la Sierra Este de California, *CARMA* se encuentra a una altitud de 2200 m. El interferómetro dispone de receptores de polarización dual (Hull & Plambeck, 2015) que permiten medir dos productos de polarización circular: derecha e izquierda (R y L). Además, el correlador de línea espectral permite medir los cuatro productos de polarización cruzada (RR, LL, RL y LR) para cada una de las 105 líneas de base. Cada receptor tiene un *feed horn*, una guía de ondas a modo de polarizador circular, un transductor ortomodo (OMT), dos mezcladores heterodinos y dos amplificadores de ruido bajo. Los receptores están enfriados en un cámara *dewar* a unos 4 K. La señal del oscilador local (LO) y la señal del cielo se combinan usando un separador de polímero termoplástico conocido como *mylar*, que se coloca frente a la ventana del *dewar*. Hay que hacer notar que el polarizador circular está diseñado con dos retardadores girados entre sí de modo que pueden operar en un gran rango de frecuencias (210-270 GHz; Plambeck & Engargiola, 2010), convirtiendo los productos de polarización circular L y R en productos de polarización ortogonales X e Y. Más tarde, estos productos lineales son separados por el OMT (Navarrini et al. 2006) que posteriormente se mezclan y se amplifican en el correlador.

El sistema de polarización de *CARMA* permite medir la emisión polarizada de polvo, procedente de la emisión de continuo milimétrico. Esta emisión procede de la acción de los granos de polvo sobre la radiación. Los granos de polvo son alargados y se alinean preferentemente de forma perpendicular al campo magnético, polarizando linealmente una fracción de la radiación que puede ser usada para inferir la orientación y la morfología del campo magnético que permea el polvo. Se pueden construir así mapas de los cuatro parámetros de *Stokes* (I, Q, U, V) y, a partir de estos, subproductos como

siguientes publicaciones: Stephens et al. (2014); Segura-Cox et al. (2014).

mapas del ángulo de posición de la emisión polarizada $\chi = 0,5 \times \arctan(U/Q)$ y de la intensidad de polarización $P = \sqrt{Q^2 + U^2}$ (notar que en este tipo de estudios no se usa el *Stokes V*, ya que éste se refiere a luz circularmente polarizada, que no esperamos debido a la polarización lineal producida por los granos de polvo).

Como de costumbre, los datos de *CARMA* se redujeron usando el paquete *MIRIAD* (Sault et al. 1995). Para hacer la calibración de los cuatro productos de polarización en *CARMA* (modo *Full Stokes*), además de las calibraciones usuales en interferometría milimétrica (*bandpass*, fase y calibración de flujo absoluto), se deben calibrar también la fase relativa entre los productos X e Y (debida a diferencias en los retrasos o *delays* en la fase de los productos L y R) y la calibración del *leakage* o *goteo* (debido al acoplamiento entre las señales L y R causado por las imperfecciones de los polarizadores y los OMTs y otros acoplamientos que se puedan dar en el correlador). La fase XY se calibra girando una malla metálica situada en el camino óptico de cada uno de los telescopios de 10 m. La polarización vertical se obtiene al colocar la malla, la horizontal se obtiene al conectar una fuente de ruido tras la malla. Este proceso dura unos 10 segundos y se realiza incluso cuando el telescopio está siguiendo una fuente. La calibración del *leakage* requiere observaciones de una fuente brillante con un cubrimiento suficiente de ángulo paraláctico. En el caso de los experimentos de efecto *Zeeman*, los productos de polarización usados en el análisis posterior son los *Stokes I* y *V*. La reducción sigue un procedimiento análogo al explicado anteriormente, sólo que aplicada a la emisión de líneas espectrales.

3. Polarización en el disco de HL Tau

Las observaciones de polarización del continuo a 1.25 mm realizadas en HL Tau con *CARMA* (Stephens et al., 2014) suponen la primera medida espacialmente resuelta del campo magnético en el disco de acreción de una protoestrella T Tauri (Clase I – Clase II). Si bien se había inferido la intensidad del campo magnético en la parte más interna de estos discos mediante observaciones infrarrojas, la morfología e intensidad del campo en el disco de una T Tauri no se había observado hasta el momento. Las observaciones muestran cómo el campo magnético medido en escalas de 80 AU se alinea principalmente con el eje mayor del disco. De aquí concluimos que el campo magnético del disco no puede estar dominado por una componente vertical (poloidal), aunque tampoco un campo toroidal explica completamente los datos. Las inconsistencias entre observación y modelos sugieren que el papel del campo magnético en discos de acreción de estrellas T Tauri podría ser más complejo que lo entendido por los estudios teóricos.

4. Frenado magnético y discos en Clase 0

En discos sin turbulencia que tienen el eje de rotación alineado con el eje magnético, el *frenado magnético* puede tener un efecto significativo en la tasa de acreción de la protoestrella, dada su capacidad para remover

momento angular del disco (e. g., Mellon & Li, 2008). El incremento en la tasa de acreción podría conllevar la “desaparición” de los discos circunestelares jóvenes. La predicción es entonces que los discos entorno a protoestrellas de Clase 0 no tienen radios de más de ~ 15 AU. Además, estos discos no mostrarían movimientos Keplerianos y sólo alcanzarían radios de 100 AU al llegar a la fase de Clase II (e.g., Dapp & Basu, 2010). Sin embargo, recientemente se han descubierto objetos de Clase 0 que tienen discos de radios mayores a 15 AU (también hay otros con discos menores a 15 AU o en los que no se ha detectado un disco). Estas diferencias en el tamaño del disco podrían ser consecuencia de la orientación relativa entre el eje de rotación y el campo magnético en cada caso, ya que en teoría, cuanto menor es el alineamiento de estos dos, mayor sería el frenado magnético (Joos et al., 2012).

Las observaciones que nuestro grupo ha realizado en algunos objetos de Clase 0 con *CARMA* (L1157, Stephens et al. (2013) y L1527, Segura-Cox et al. (2014)), junto con un puñado de observaciones disponibles en la literatura, plantean la existencia de una posible tendencia empírica en este sentido: la diferencia en el tamaño de los discos podría estar relacionada con la orientación relativa entre campo magnético y eje de rotación del disco. Cuanto más alineados el campo magnético y el eje de rotación, más eficiente es el *frenado magnético* y menor es el disco.

5. Efecto Zeeman en la transición CN(2-1)

En presencia de un campo magnético, los niveles energéticos de moléculas y átomos se separan debido a la interacción entre el campo magnético y el momento dipolar magnético asociado al momento angular orbital. La separación de los niveles resulta en la separación de las líneas espectrales correspondientes a diferentes polarizaciones. Esto se conoce como efecto *Zeeman*, que es la única forma directa de medir la intensidad del campo magnético (a lo largo de la línea de visión) en nubes moleculares y núcleos densos (Crutcher et al., 2009).

La molécula de CN es capaz de trazar el efecto *Zeeman* (Hakobian & Crutcher, 2011) siendo además un buen trazador del gas denso, lo que la convierte en una buena herramienta para el estudio del campo magnético de las nubes más densas, en las que se forman las estrellas de alta masa. Anteriormente se habían obtenido detecciones de efecto *Zeeman* con observaciones de baja resolución angular (e.g., Falgarone et al., 2008).

Reportamos aquí el resultado de las nuevas observaciones hechas con tiempo comisionado por *CARMA* en la región de formación de estrellas masivas W3OH con resoluciones de $3''$ (ver Figura 1). Mediante la observación de nueve transiciones de CN(2-1) y el posterior ajuste del efecto de desdoblamiento en todas ellas de forma simultánea, logramos la primera detección interferométrica del efecto *Zeeman* en el núcleo denso de una nube molecular. El campo magnético en la línea de visión alcanza los 4 mG y muestra claras diferencias espaciales. La medida de 4 mG es cuatro veces mayor que la medida anteriormente realizada con IRAM 30-m ($\theta = 23''$) en la misma región (Falgarone et al., 2008).

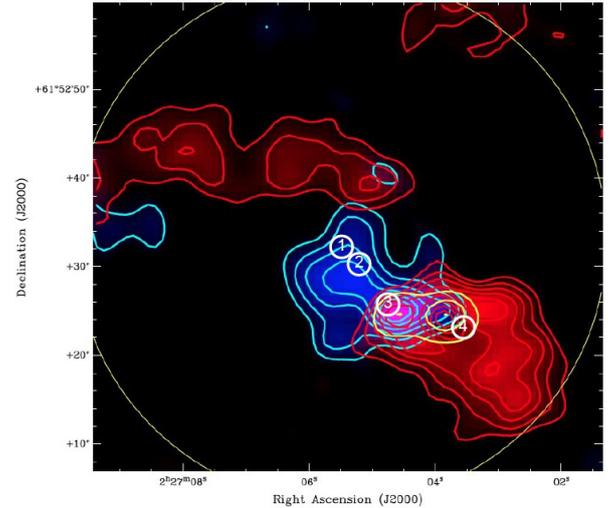


Fig. 1: Mapa de emisión integrada de CN(2 – 1) en W3OH. Los contornos rojos/azules muestran la emisión integrada de velocidad intermedia desplazada al rojo ($v = [0,5, 4,5]$ km s $^{-1}$) y al azul ($v = [-4,5, -0,5]$ km s $^{-1}$). Los contornos amarillos muestran la emisión de continuo. Los círculos muestran los cuatro lugares donde se ha detectado el efecto Zeeman.

6. Epílogo

Cada vez son más numerosos los estudios interferométricos del campo magnético. El desarrollo de instrumentos más sensibles, a la vez que capaces de producir imágenes de alta resolución, harán que nuestra comprensión del rol que desempeña el campo magnético en los procesos de formación estelar mejore sustancialmente en los próximos años.

Referencias

- Crutcher R. M., et al., 2009, ApJ, 692, 844
 Dapp W. B., Basu S., 2010, A&A, 521, L56
 Falgarone E., et al., 2008, A&A, 487, 247
 Girart J. M., Rao R., Marrone D. P., 2006, Science, 313, 812
 Hakobian N. S., Crutcher R. M., 2011, ApJ, 733, 6
 Hughes A. M., et al., 2013, AJ, 145, 115
 Hughes A. M., et al., 2009, ApJ, 704, 1204
 Hull C., Plambeck R., 2015, CARMA Memo #64, 64
 Hull C. L. H., et al., 2013, ApJ, 768, 159
 Joos M., Hennebelle P., Ciardi A., 2012, A&A, 543, A128
 Mellon R. R., Li Z.-Y., 2008, ApJ, 681, 1356
 Plambeck R. L., Engargiola G., 2010, CARMA Memo #54
 Rao R., et al., 2014, ApJL, 780, L6
 Segura-Cox D. M., et al., 2014, ApJ, submitted
 Stephens I. W., et al., 2014, Nature, 514, 597
 Stephens I. W., et al., 2013, ApJL, 769, L15