

Emisión (sub)milimétrica polarizada de discos protoplanetarios

M. Fernández López¹

¹ Instituto Argentino de Radioastronomía, CONICET-CICPBA-UNLP, Argentina

Contacto / manferna@gmail.com

Resumen / Se piensa que los discos protoplanetarios son magnéticamente activos y que podrían transportar momento angular mediante inestabilidades magneto-rotacionales y vientos de disco. Estas hipótesis han servido de base teórica para buscar el campo magnético en discos mediante técnicas polarimétricas, implicando necesariamente observaciones de alta resolución angular (escalas de menos de 100 ua) y gran sensibilidad (la fracción de luz polarizada suele ser de menos del 1% de la luz recibida en estos objetos). Gracias a las enormes prestaciones del telescopio *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)*, los estudios de luz polarizada en ondas milimétricas y submilimétricas hacia discos protoplanetarios se han multiplicado en los últimos seis años. Este tipo de observaciones fueron diseñadas para medir y mapear la distribución espacial del campo magnético en los discos, pero la naturaleza de las primeras detecciones incluyó sorpresas que condujeron a un rápido desarrollo teórico para explicar el origen de la luz polarizada en ondas (sub)milimétricas, distinto del que se da en general en el Medio Interestelar (alineación preferente de granos de polvo en torno a líneas de campo magnético). En esta contribución haré un resumen de las investigaciones polarimétricas en discos protoplanetarios tanto en el plano observacional como en el teórico. Presentaré algunos de los caminos propuestos en la actualidad para obtener información acerca del campo magnético en discos.

Abstract / Protoplanetary disks are thought to be magnetically active and could transport angular momentum via magneto-rotational instabilities and disk winds. These hypothesis have been the theoretical background in order to understand magnetic fields in disks via high-angular resolution (< 100 au scales) and great sensitivity (polarized fraction in these objects is typically $\sim 1\%$) polarimetric observations. Due to the enormous capabilities of the *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)* telescope, polarization studies at millimeter and submillimeter wavelengths toward protoplanetary disks have grown in the last six years. These observations were intended to map and measure the spatial distribution of the magnetic field in disks. Surprisingly, the actual origin of the polarized emission in disks differs from the Interstellar Medium typical origin (dust grains aligned along magnetic field lines). In this contribution I will review the interferometric polarimetry research in protoplanetary disks both in the theoretical and the observational facets. I will present some paths currently proposed to obtain information of magnetic fields in disks.

Keywords / stars: formation — stars: protostars — protoplanetary disks — submillimeter: ISM — techniques: interferometric — techniques: polarimetric

1. Polarización (sub)milimétrica con interferómetros

La emisión del polvo en el Medio Interestelar está polarizada linealmente debido a que los granos de polvo se alinean preferentemente con su eje menor paralelo al campo magnético mediante un proceso de torques radiativos (ejm., Andersson et al., 2015). Por otra parte, se espera que los discos protoplanetarios sean objetos magnéticamente activos: con campos que podrían controlar el transporte de momento angular (Blandford & Payne, 1982; Balbus & Hawley, 1998) y la eyección de vientos de disco (ejm., Konigl & Pudritz, 2000). Debido al tamaño de los discos (~ 100 ua) y la distancia típica a las estrellas jóvenes en formación (> 150 pc), para obtener información detallada del campo magnético se necesitan observaciones de alta resolución angular. Además, debido a que estos objetos suelen estar embebidos en ambientes con mucha extinción dentro de sus nubes moleculares originales, son accesibles preferente-

mente en longitudes de onda radio, especialmente en ondas milimétricas y submilimétricas. Estas observaciones sólo han sido posibles durante los últimos seis o siete años (antes de 2015, véanse los trabajos de Hughes et al., 2009, 2013, reportando no detecciones en varios discos).

La expectativa teórica consiste en la presencia de un campo magnético toroidal en los discos y, por tanto, un patrón de polarización radial (en el caso de poder detectar el campo responsable de un viento de disco, el patrón esperado sería poloidal). Sin embargo, en algunas de las primeras detecciones interferométricas (con resoluciones de $0.4'' - 0.6''$) se pudo ver que esta tendencia no aparecía en discos de estrellas T-Tauri o protoestrellas de alta masa (Stephens et al., 2014; Segura-Cox et al., 2015; Fernández-López et al., 2016). En cambio, la polarización presentaba una dirección lineal y uniforme a lo largo del eje menor del disco (Fig. 1).

Con el advenimiento del telescopio *ALMA*, la emisión polarizada del continuo (emisión térmica del polvo) se pudo resolver espacialmente, con decenas de píxeles

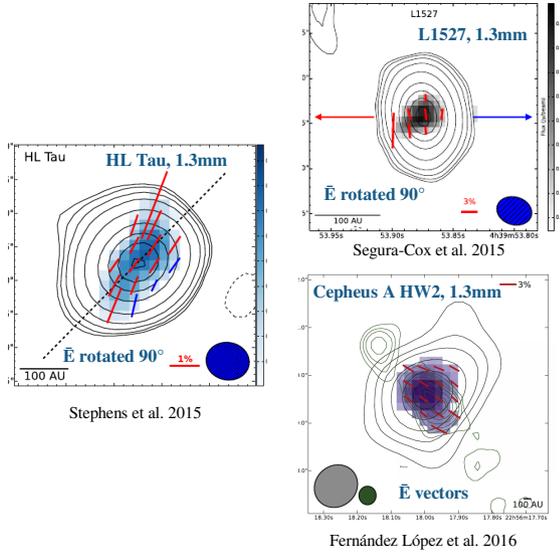


Figura 1: Primeras detecciones interferométricas de la emisión de continuo polarizada que mostraban un patrón lineal y uniforme en discos protoplanetarios. Figuras adaptadas y reproducidas con permiso de Stephens et al. (2014) (izquierda, Springer Nature), Segura-Cox et al. (2015) (derecha arriba, © AAS) y Fernández-López et al. (2016) (derecha abajo, © AAS).

independientes a lo largo de un disco (ver Fig. 2 y, por ejemplo, Stephens et al., 2017; Alves et al., 2018; Girart et al., 2018; Harris et al., 2018; Hull et al., 2018). Estas observaciones han mostrado distintas morfologías en distintas fuentes (polarización lineal, toroidal, mezcla, ver por ejemplo Girart et al., 2018; Dent et al., 2019; Harrison et al., 2019), pero también distintas morfologías en un mismo disco dependiendo de la longitud de onda observada (ver los estudios de Kataoka et al., 2017; Stephens et al., 2017, en el disco de HL Tauri), dejando en entredicho el origen de la emisión polarizada. En otros estudios, por el contrario, el patrón de polarización no muestra dependencia de la longitud de onda para un mismo disco (Alves et al., 2018). Como veremos en la Sec. 2, en estos años han surgido nuevas ideas teóricas basadas en procesos de autodispersión (*selfscattering*) y/o alineamiento de granos de polvo sin campos magnéticos, tratando de comprender el número creciente de resultados diversos.

2. Naturaleza de la emisión (sub)milimétrica polarizada

A partir de las detecciones interferométricas milimétricas pioneras por Rao et al. (2014) y Stephens et al. (2014) surgieron una serie de artículos que proponían procesos de dispersión producida por los propios granos de polvo (autodispersión) para explicar la emisión de continuo polarizada linealmente en discos (Kataoka et al., 2015; Yang et al., 2016). Se han unido a éstos, otros trabajos en los que se proponen mecanismos de

alineamiento de granos de polvo que no involucran campos magnéticos (ejm., Tazaki et al., 2017; Kataoka et al., 2019; Lin et al., 2021).

2.1. Autodispersión

Es bien sabido que la luz infrarroja procedente de una protoestrella, dispersada por los granos de polvo de las capas superficiales de un disco circumestelar queda polarizada y muestra un patrón centro-simétrico con origen en la fuente iluminadora (ver por ejemplo, Hashimoto et al., 2011). En ondas (sub)milimétricas, sin embargo, el origen de la radiación de continuo es el propio polvo del disco circumestelar y los procesos de dispersión se producen también en los granos de polvo. Es por eso que, a estos procesos de dispersión, se los ha dado en llamar de “autodispersión” (Kataoka et al., 2015). Los modelos que simulan los procesos de autodispersión muestran que el patrón de polarización en un disco inclinado y proyectado en el plano del cielo tiene una configuración lineal y uniforme alineada con el eje menor del disco, lo que explicaría las observaciones en muchos objetos jóvenes, preferentemente en longitudes de onda submilimétricas (Yang et al., 2016). Las simulaciones de autodispersión en discos también prevén que la emisión polarizada se distribuya a lo largo del eje mayor en discos inclinados y que el pico de la emisión polarizada no coincida con el centro del mismo en discos gruesos (Yang et al., 2017).

La determinación del origen por autodispersión de la emisión polarizada en discos ha servido para obtener una medida independiente del tamaño máximo de los granos de polvo en el disco, puesto que la dispersión debida a granos de polvo con tamaño máximo $\sim a$, muestra una gran dependencia con la longitud de onda, $a \sim \lambda/2\pi$ (ver Fig. 3, Kataoka et al., 2017).

2.2. Alineamiento de granos de polvo

Como ya hemos mencionado, los campos magnéticos alinean los granos de polvo presentes en el Medio Interestelar en una combinación de rotación supratérmica de los granos, torques radiativos y precesión en torno a las líneas de campo. Lo hacen preferentemente de forma que el eje mayor de los granos se dispone perpendicularmente a la orientación del campo y por tanto, los vectores de polarización deben ser rotados 90° para mostrar la dirección del campo magnético. Esta técnica se ha usado con éxito en numerosas publicaciones recientes mostrando los resultados obtenidos por el satélite Planck (ejm., Planck Collaboration et al., 2016, 2020).

Sin embargo, en los últimos años se han propuesto y rescatado otros mecanismos de alineamiento de granos que podrían producir la emisión polarizada (sub)milimétrica en algunos discos. De forma muy esquemática, los ingredientes necesarios para generar la polarización son: una fuerza externa que haga rotar los granos de polvo (ejm., torques radiativos o mecánicos) y una dirección en torno a la que el grano precese (puede ser definida, por ejemplo, por un campo magnético, un flujo radiativo anisotrópico, o un flujo de partículas de

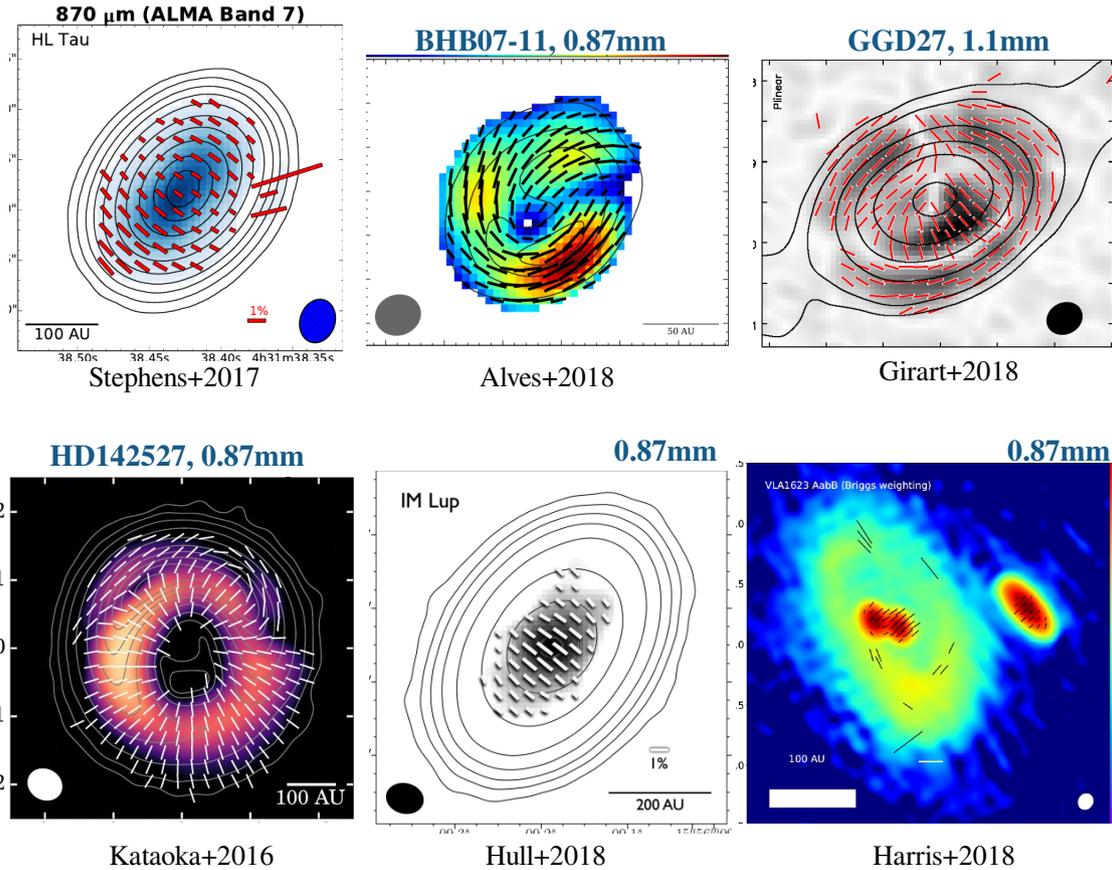


Figura 2: Distintos patrones de polarización lineal en discos protoplanetarios observados con ALMA. Las figuras muestran la gran capacidad de este telescopio para obtener decenas de medidas independientes en el interior de los discos. Fila superior, de izquierda a derecha, figuras adaptadas y reproducidas con permiso de: Stephens et al. (2017) (© AAS), Alves et al. (2018) (© ESO) y Girart et al. (2018) (© AAS). Fila inferior, de izquierda a derecha, figuras reproducidas con permiso de: Kataoka et al. (2016) (© AAS), Hull et al. (2018) (© AAS) y Harris et al. (2018) (© AAS).

gas). Si el alineamiento de los granos se produce antes de que ocurra una colisión con otra partícula que aleatorice su dirección, entonces la emisión térmica del ensamble de granos, preferentemente alineados en una dirección, queda linealmente polarizada. Como dijimos anteriormente, en el caso del alineamiento de granos mediante un campo magnético toroidal, el patrón de polarización en un disco visto de frente debería ser radial. En el caso del alineamiento radiativo, el patrón sería, en cambio, toroidal, y este mecanismo dominaría en granos mayores a $50 \mu\text{m}$ (Tazaki et al., 2017). El alineamiento mecánico fue propuesto ya por Gold (1952) y operaría en el caso de flujos supersónicos. En los discos circumstelares, donde el flujo de gas con respecto al movimiento de los granos de polvo sería subsónico, son necesarios granos con una cierta helicidad para lograr su alineación (Kataoka et al., 2019). Para flujos supersónicos el patrón de polarización en un disco sería toroidal, mientras que

para flujos subsónicos el patrón cambiaría desde el toroidal hasta uno espiral y dependería del número de Stokes que caracteriza el comportamiento de las partículas en un flujo.

3. Aplicación de la teoría

A partir de los diagnósticos y predicciones hechas por los modelos y simulaciones que presentan los desarrollos teóricos expuestos en la Sec. 2 se comenzaron a interpretar los resultados observacionales obtenidos con ALMA. Cuando se encuentra una distribución lineal y uniforme a lo largo del eje menor del disco (normalmente en longitudes de onda submilimétricas) se interpreta como originada por efecto de la autodispersión. En cam-

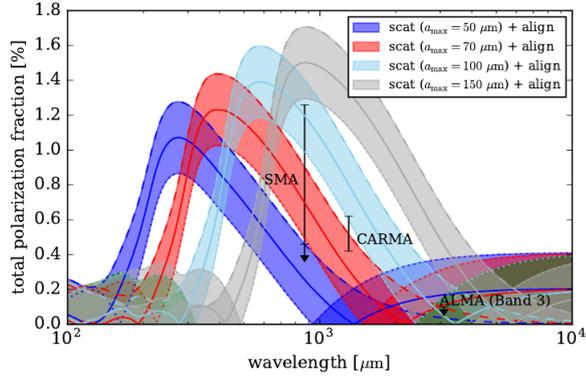


Figura 3: Curvas mostrando la fracción de polarización en función de la longitud de onda, para diferentes tamaños de granos de polvo (entre 50 y 150 μ m). Figura reproducida con permiso de Kataoka et al. (2017) (© AAS).

bio, un patrón toroidal de los *vectores* de polarización* podría deberse al alineamiento radiativo o mecánico de granos (suele observarse a longitudes de onda milimétricas, normalmente a más de ~ 3 mm; ver por ejemplo, Harrison et al., 2019). Patrones que parecen ser mezcla entre ambas configuraciones (observados a longitudes de onda entre 3 mm y 0.9 mm) suelen interpretarse como una transición entre ambos regímenes, sobre todo cuando los tres patrones se observan en un mismo objeto (HL Tauri es el ejemplo paradigmático de este comportamiento, Stephens et al., 2017; Lin et al., 2021).

En otros discos, se ha encontrado un patrón lineal uniforme alineado con el eje menor en el centro del disco, y una distribución azimutal en las afueras (Girart et al., 2018; Bacciotti et al., 2018; Sadavoy et al., 2019). Las interpretaciones son diversas aunque en todos los casos coinciden en que en el centro, la polarización es debida a la autodispersión. En cambio en las afueras, el patrón azimutal podría deberse a un efecto de autodispersión (como el esperado para estructuras anulares, Kataoka et al., 2015), o bien al alineamiento de granos radiativo o mecánico. El cambio de una morfología a otra podría deberse a variaciones en la opacidad del disco (Girart et al., 2018; Lin et al., 2021).

Las observaciones polarimétricas han llegado también a sistemas múltiples con protoestrellas asociadas a discos circunestelares y circumbinarios. En el sistema VLA 1623 el disco circumbinario en torno a las componentes A y B muestra un patrón de polarización azimutal que podría explicarse por alineamiento de granos con un campo magnético en forma de reloj de arena (Harris et al., 2018; Sadavoy et al., 2018). Un campo magnético poloidal sería también responsable de la polarización en el sistema BHB07-11 (Alves et al., 2018),

*Nótese que, a pesar de que comúnmente se denominan vectores, los segmentos que indican el ángulo de posición de la polarización lineal proyectada en el plano del cielo, no siempre indican la magnitud del porcentaje de polarización y, aunque muestran una dirección, no muestran el sentido, por lo que no tienen todos los elementos que concurren en la definición de vector.

aunque no quedan descartados el alineamiento radiativo o mecánico, pero sí la autodispersión (que es altamente dependiente de la longitud de onda de observación), puesto que se observa el mismo patrón espiral a 3, 1 y 0.9 mm.

Son por tanto los patrones azimutales o toroidales los que, hasta el momento, han causado mayores problemas para ser interpretados. En este sentido, en los últimos años se han conducido varios desarrollos teóricos apuntando en diferentes direcciones. Yang et al. (2019) distinguieron entre patrones toroidales con vectores tangentes a la elipse que delinea un disco inclinado proyectado en el plano del cielo, y los patrones toroidales con vectores tangentes a una circunferencia. Los primeros se deberían a alineamiento mecánico (denominado “aerodinámico” por esos autores), mientras que el segundo tipo se produciría en el alineamiento radiativo. Este estudio llevó a sus autores a descartar el alineamiento radiativo como forma de explicar el patrón azimutal en discos como el de HL Tauri, Haro 6-13 o DG Tauri. Guillet et al. (2020) propusieron que los granos con tamaños del orden de la longitud de onda de observación polarizarían la luz a lo largo de su eje menor, y predijeron un cambio brusco, de 90° , en los vectores de polarización en observaciones a longitudes de onda cercanas. Más recientemente, Mori & Kataoka (2021) han propuesto un modelo fenomenológico con el que, mezclando la emisión por autodispersión y la de un ensamble de granos prolato alineados azimutalmente, explicarían la morfología azimutal de la polarización, la distribución espacial de la intensidad de polarización y la fracción de polarización. Tomando como hipótesis de trabajo que el patrón azimutal se debe posiblemente a que los granos del disco muestran algún tipo de alineamiento, Lin et al. (2021) han mostrado un acuerdo muy bueno entre sus modelos y las observaciones de HL Tauri en todas las bandas usadas por ALMA. Estos modelos se basan en la emisión y dispersión de una población de granos alargados (no esféricos) alineados. Incluyendo a estos dos mecanismos el efecto de la opacidad, los modelos de Lin et al. (2021) reproducen cualitativamente la dependencia en frecuencia de los patrones de polarización de HL Tauri.

4. Estudios de autodispersión

El reconocimiento de que las observaciones de la emisión de continuo polarizada en las bandas (sub)milimétricas en discos protoplanetarios no muestran la morfología esperada por la acción de los campos magnéticos, no impide que este tipo de estudios no sea provechoso en otros aspectos. De hecho, el análisis multi-frecuencia de la autodispersión puede utilizarse como una medida independiente del tamaño de los granos de polvo en discos. Este punto puede tener derivaciones relevantes en el ámbito de la formación planetaria. Por otra parte, el efecto de la autodispersión en discos gruesos puede usarse para caracterizar determinados aspectos de su geometría y orientación.

El tamaño máximo de los granos de polvo en un disco ha sido inferido típicamente mediante la medición del índice espectral de la emisión de continuo en el rango 1 mm – 3 mm (ejm., Tazzari & Lodato, 2015; Tazzari

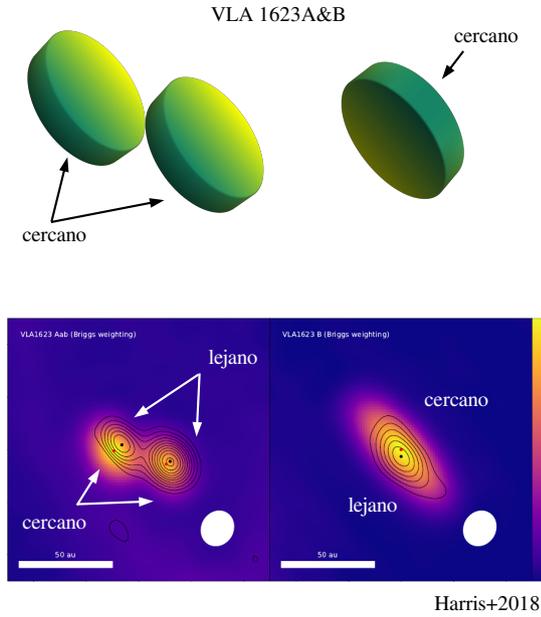


Figura 4: Orientación de los discos en el sistema múltiple VLA 1623. Emisión del continuo de polvo (contornos) y emisión polarizada (escala de colores) de las componentes Aab (panel inferior izquierdo) y B (panel inferior derecho). Figuras adaptadas y reproducidas con permiso de Harris et al. (2018) (© AAS). La parte superior de la figura muestra de forma esquemática la orientación de los discos inferida a partir de las observaciones polarimétricas.

et al., 2021). Sin embargo, es sabido que este tipo de medidas llevan aparejadas ciertos problemas (efectos de opacidad, efectos de dispersión, composición química de los granos, etc) que pueden adulterar sus resultados. En todo caso, este tipo de estudios estiman que el tamaño máximo de los granos de polvo en discos protoplanetarios es típicamente > 1 mm. La autodispersión, por su lado, al ser un efecto muy dependiente tanto de la frecuencia como del tamaño de los granos, supone una medida directa de este último parámetro (ejm., Kataoka et al., 2017). Los tamaños máximos típicos derivados con este segundo método son del orden de $100 \mu\text{m}$, un orden de magnitud menores que los estimados con el índice espectral. Ohashi et al. (2020) mostraron hace poco que una forma de reconciliar los dos observables (índice espectral y fracción de polarización), además de tener en cuenta el tamaño de los granos, es considerar el efecto de la opacidad y/o los posibles efectos de asentamiento de granos grandes en el plano medio del disco (estratificación vertical del polvo).

En cuanto a los discos inclinados gruesos, Yang et al. (2017) mostraron cómo el pico de su emisión polarizada queda desplazado con respecto a sus centros. Esto determina cuál es el borde cercano o lejano de dichos discos, pudiéndose inferir su orientación 3D (Fig. 4, véanse también Girart et al., 2018; Harris et al., 2018).

5. Cómo medir campos magnéticos en discos

Las predicciones teóricas acerca de los procesos de acreción en discos protoplanetarios involucran turbulencia magneto-hidrodinámica basada en inestabilidades magneto-rotacionales y/o vientos magnéticos. Por tanto, el rol del campo magnético en discos seguiría siendo preponderante y, sin embargo, existen pocas evidencias empíricas de su existencia (el campo ha sido medido en estrellas T Tauri y a distancias menores a 1 ua, Donati et al., 2005; Johns-Krull, 2007). Las observaciones de la emisión polarizada de continuo con ALMA muestran como efectos dominantes la autodispersión y el alineamiento mecánico. A pesar de estas conclusiones preliminares (que necesitan ser confirmadas), se han publicado varios trabajos que sugieren la alineación magnética de los granos en varios discos (Alves et al., 2018; Lee et al., 2018; Ohashi et al., 2018; Takahashi et al., 2019). En estos casos, una mezcla de métodos de alineamiento, efectos de opacidad, u otros aspectos, como la contaminación con la emisión del núcleo denso que rodea los discos en sus etapas tempranas, han de ser tenidos en cuenta para poder descartar alternativas.

Es por esto, que las técnicas tal vez más prometedoras para la detección y medición del campo magnético a lo largo y ancho de todo el disco son los estudios de polarización (sub)milimétricos en líneas moleculares, usando tanto el efecto Zeeman (polarización circular), como el efecto Goldreich-Kylafis (polarización lineal).

5.1. Efecto Zeeman

El efecto Zeeman es la única manera directa de medir la magnitud del campo magnético. Hasta el momento, los experimentos llevados a cabo con interferómetros en discos protoplanetarios para medir la polarización circular de transiciones moleculares se han centrado en la observación de la molécula de CN, que tiene un momento dipolar comparativamente grande. Por el momento sólo se han conseguido poner cotas superiores a un hipotético campo magnético toroidal en los discos de TW Hya (< 30 mG Vlemmings et al., 2019) y AS 209 (< 9 mG Harrison et al., 2021). Es necesario buscar nuevos trazadores moleculares, tal vez mejores candidatos (discos más brillantes, cercanos, inclinados, etc), observaciones aún más profundas con ALMA, y una mejor caracterización de la respuesta instrumental en el parámetro de Stokes V a fin de asegurar una detección (ver, por ejemplo, Lankhaar et al., 2022). Una razón alternativa para explicar la falta de detección es que la polaridad del campo magnético cambie de un lado al otro del plano medio del disco. En este caso, los límites superiores obtenidos podrían ser erróneos y habría que diseñar un experimento en un disco con una geometría más ventajosa. Por otra parte la caracterización de la polarización circular instrumental en ALMA no ha sido bien caracterizada hasta este momento.

La conclusión de estos estudios preliminares parece ser que, de conseguirse una detección, el efecto Zeeman no sería una técnica aplicada a un gran número de objetos por requerir grandes tiempos de integración. Por

contra, si se pudiese medir el campo en algunos pocos objetos la información que estas observaciones proporcionarían sería de gran valor.

5.2. Efecto Goldreich-Kylafis

La polarización lineal en líneas moleculares (*efecto Goldreich-Kylafis* o efecto GK) también ha sido estudiada en discos protoplanetarios con resultados dudosos, aunque promisorios. Para su detección, es necesario un campo de radiación anisotrópico o un gradiente de velocidad. Además, los últimos estudios teóricos muestran que es necesario tener líneas no termalizadas. La polarización debida al efecto GK puede mostrar la dirección paralela o perpendicular al campo magnético y, aunque se ha podido detectar anteriormente en nubes y flujos moleculares, las detecciones en discos reportadas son sólo marginales. Stephens et al. (2020) detectaron una polarización menor al 1 % en el disco de HD 142527, sólo tras promediar la emisión de CO del disco en espacio y velocidad. De forma análoga Teague et al. (2021) mostraron la posible detección del efecto GK en el disco de TW Hya, tras asumir un campo toroidal/poloidal. Esta técnica está recién comenzando a explorarse y el número de experimentos realizados es aún muy pequeño y podría haber resultados novedosos en un período corto de tiempo.

6. Resumen

En esta contribución se trataron de resumir los grandes avances ocurridos en el área de polarización (sub)milimétrica de discos protoplanetarios en los últimos años. Desde la llegada del observatorio *ALMA* se ha observado que la distribución espacial de los vectores de polarización muestra distintos patrones en distintas fuentes, pero también distintos patrones en función de la longitud de onda de observación.

A longitudes de onda menores que 1 mm, típicamente se observan patrones lineales y uniformes de vectores orientados de forma paralela al eje menor de los discos. Estos patrones se han identificado con efectos de autodispersión en el polvo de los discos. La autodispersión permite la medición independiente del tamaño de los granos de polvo en discos. Los tamaños obtenidos por medio de esta técnica son un orden de magnitud menores a los obtenidos con el análisis del índice espectral. La solución más prometedora residiría en posibles efectos de opacidad. Por otra parte, el efecto de la autodispersión en discos gruesos puede usarse para obtener información acerca de su geometría tridimensional.

A longitudes de onda mayores que 1 mm, los vectores de polarización en los discos muestran típicamente patrones azimutales. Se han propuesto diversos mecanismos de alineamiento de granos (magnético, radiativo, mecánico), con estudios acerca de la microfísica de los granos de polvo (forma, porosidad, composición, cinemática, propiedades ópticas,...). Los modelos fenomenológicos usando ensambles de granos alargados y prolatos parecen reproducir las características de las observaciones a estas longitudes de onda. Además, los modelos

que incluyen dispersión y alineamiento de granos alargados, más efectos de opacidad, son capaces de reproducir la transición en la morfología de la polarización entre longitudes de onda largas (azimutal) y cortas (lineal y uniforme).

Por último, la vía más clara para obtener información del campo magnético en discos protoplanetarios vendría del análisis de la polarización en líneas moleculares. Por el momento sólo se han reportado detecciones marginales y/o cotas superiores al campo en experimentos de *efecto Zeeman*.

Agradecimientos: Agradezco el entusiasmo y la enorme ayuda que me han dado las discusiones acerca de polarización del grupo encabezado por el Dr. Haifeng Yang, en el que conversamos con Ian Stephens, Zhi-Yun Li, Leslie Looney, Daniel Lin y Rachel Harrison.

Referencias

- Alves F.O., et al., 2018, *A&A*, 616, A56
 Andersson B.G., Lazarian A., Vaillancourt J.E., 2015, *ARA&A*, 53, 501
 Bacciotti F., et al., 2018, *ApJL*, 865, L12
 Balbus S.A., Hawley J.F., 1998, *Rev. Mod. Phys.*, 70, 1
 Blandford R.D., Payne D.G., 1982, *MNRAS*, 199, 883
 Dent W.R.F., et al., 2019, *MNRAS*, 482, L29
 Donati J.F., et al., 2005, *Nature*, 438, 466
 Fernández-López M., et al., 2016, *ApJ*, 832, 200
 Girart J.M., et al., 2018, *ApJL*, 856, L27
 Gold T., 1952, *Nature*, 169, 322
 Guillet V., et al., 2020, *A&A*, 634, L15
 Harris R.J., et al., 2018, *ApJ*, 861, 91
 Harrison R.E., et al., 2019, *ApJL*, 877, L2
 Harrison R.E., et al., 2021, *ApJ*, 908, 141
 Hashimoto J., et al., 2011, *ApJL*, 729, L17
 Hughes A.M., et al., 2009, *ApJ*, 704, 1204
 Hughes A.M., et al., 2013, *AJ*, 145, 115
 Hull C.L.H., et al., 2018, *ApJ*, 860, 82
 Johns-Krull C.M., 2007, *ApJ*, 664, 975
 Kataoka A., Okuzumi S., Tazaki R., 2019, *ApJL*, 874, L6
 Kataoka A., et al., 2015, *ApJ*, 809, 78
 Kataoka A., et al., 2016, *ApJL*, 831, L12
 Kataoka A., et al., 2017, *ApJL*, 844, L5
 Konigl A., Pudritz R.E., 2000, V. Mannings, A.P. Boss, S.S. Russell (Eds.), *Protostars and Planets IV*, 759
 Lankhaar B., Vlemmings W., Bjerkeli P., 2022, *A&A*, 657, A106
 Lee C.F., et al., 2018, *ApJ*, 854, 56
 Lin Z.Y.D., et al., 2021, arXiv e-prints, arXiv:2112.10998
 Mori T., Kataoka A., 2021, *ApJ*, 908, 153
 Ohashi S., et al., 2018, *ApJ*, 864, 81
 Ohashi S., et al., 2020, *ApJ*, 900, 81
 Planck Collaboration, et al., 2016, *A&A*, 594, A24
 Planck Collaboration, et al., 2020, *A&A*, 641, A12
 Rao R., et al., 2014, *ApJL*, 780, L6
 Sadavoy S.I., et al., 2018, *ApJ*, 869, 115
 Sadavoy S.I., et al., 2019, *ApJS*, 245, 2
 Segura-Cox D.M., et al., 2015, *ApJL*, 798, L2
 Stephens I.W., et al., 2014, *Nature*, 514, 597
 Stephens I.W., et al., 2017, *ApJ*, 851, 55
 Stephens I.W., et al., 2020, *ApJ*, 901, 71
 Takahashi S., et al., 2019, *ApJ*, 872, 70
 Tazaki R., Lazarian A., Nomura H., 2017, *ApJ*, 839, 56
 Tazzari M., Lodato G., 2015, *MNRAS*, 449, 1118
 Tazzari M., et al., 2021, *MNRAS*, 506, 5117

Teague R., et al., 2021, ApJ, 922, 139
Vlemmings W.H.T., et al., 2019, A&A, 624, L7
Yang H., et al., 2016, MNRAS, 456, 2794

Yang H., et al., 2017, MNRAS, 472, 373
Yang H., et al., 2019, MNRAS, 483, 2371