

Francesca Bacciotti

La polarizzazione: uno strumento diagnostico per i dischi protoplanetari

Polarization: a diagnostic tool for protoplanetary disks

INAF - Osservatorio Astrofisico di Arcetri

Riassunto. Il disco rotante di gas e polvere osservato attorno alle stelle giovani è il luogo di nascita dei pianeti. Lo studio delle sue proprietà è fondamentale per comprendere la formazione e l'evoluzione di questi mondi nascenti. I dati polarimetrici ottenuti con l'Atacama Large Millimeter / Submillimeter Array (ALMA) sono un nuovo potente strumento per indagare le proprietà della polvere e della struttura magnetica in questi sistemi.

Parole chiave. Dischi protoplanetari, polarizzazione, ALMA, polvere, campi magnetici.

Lo studio dei dischi attorno alle stelle in formazione è uno degli argomenti più affascinanti dell'astrofisica moderna. Uno degli obiettivi principali di tali studi è ricostruire correttamente le condizioni iniziali per la nascita dei pianeti. Negli ultimi anni, osservazioni ad alta risoluzione angolare come quelle condotte con l'Atacama Large Millimeter / submillimeter Array (ALMA) hanno portato a passi avanti significativi nella conoscenza di questi sistemi. Grazie ad ALMA ora sappiamo, per esempio, che i dischi hanno sotto-strutture come anelli, cavità

Summary. The rotating disk of gas and dust observed around young stars is the birthplace of planets. The study of its properties is fundamental to understand the formation and evolution of nascent worlds. Polarimetric data obtained with the Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) are a new powerful tool to investigate the properties of the dust and magnetic structure in these systems.

Keywords. Protoplanetary disks, Polarization, ALMA, Dust, Magnetic fields.

The study of disks around forming stars is one of the most intriguing topics in current astrophysics. One of the main goals of such studies is to correctly establish the initial conditions for the birth of planets. In recent years, high angular resolution studies, such as those conducted with the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), have allowed for significant advances in our knowledge of these systems. Thanks to ALMA, we now know that disks have



e spirali, che possono essere associate alle fasi iniziali di aggregazione dei grani di polvere. Inoltre, le osservazioni di ALMA hanno finalmente confermato che i getti di materiale espulsi in direzione perpendicolare al disco ruotano attorno al loro asse, il che significa che in linea di principio possono estrarre il momento angolare in eccesso dal sistema stella/disco, regolandone così l'evoluzione. Vi sono però ancora numerose incognite in questo campo. Ad esempio, i modelli di aggregazione della polvere richiedono come input la conoscenza della popolazione relativa di grani di diversa dimensione e la loro distribuzione nel disco. Inoltre, la teoria di lancio magneto-centrifugo del getto, che prevede un trasferimento efficiente del momento angolare, può essere confermata solo dalla determinazione della configurazione magnetica nel sistema.

L'aumento della sensibilità nella polarimetria millimetrica con ALMA ha aperto una nuova finestra su entrambi questi argomenti. L'intensità dell'emissione polarizzata, la frazione di polarizzazione e l'angolo di polarizzazione (cioè l'orientazione del piano di oscillazione dell'onda luminosa) possono essere determinati in ogni pixel delle immagini dai parametri di Stokes I, U, Q, V della radiazione rilevata. Queste quantità sono convenzionalmente rappresentate con scale di colore e "vettori di polarizzazione" sovrapposti alle mappe. I vettori di polarizzazione possono in linea di principio fornire l'orientamento delle linee del campo magnetico, poiché i grani di polvere non sferici tendono ad allineare i loro assi più corti parallelamente alla direzione del campo magnetico, e produrre quindi radiazione con angolo di polarizzazione perpendicolare al campo. Ad esempio, per un campo prevalentemente toroidale nel disco, i vettori di polarizzazione sa-

sub-structures like rings, gaps and spirals, which may be related to the aggregation mechanisms of dust grains. In addition, ALMA observations have finally confirmed that the beautiful jets of material perpendicular to the disk rotate around their axis, which means that in principle the outflows can carry away the excess angular momentum from the star/disk system, thus regulating its evolution. There are still many unknowns in this field, however. Dust aggregation models, for example, require as input the fractional population of grains of different sizes and their distribution in the disk. On the other hand, the theory of magneto-centrifugal jet launch, which predicts an efficient angular momentum transfer between the disk and the jet, can only be confirmed by the determination of the magnetic configuration in the system.

The increase in sensitivity in mm-wave polarimetry with ALMA has opened new opportunities for investigating both these topics. The intensity of the polarized emission, the polarization fraction and the polarization angle (i.e. the orientation of the plane of the light wave) can be found in each pixel of images from the Stokes parameters I, U, Q, V of the detected wave. These quantities are conventionally shown with the help of color scales and superimposed "polarization vectors" on maps. Polarization vectors can in principle provide the orientation of magnetic field lines, as non-spherical dust grains tend to align with their short axes along the the direction of the magnetic field, thus producing radiation with polarization angle perpendicular to the field ("grain alignment"). For example, for a predominantly toroidal field in the disk, the polarization vectors would be directed radially away from the star. Polarization, however, can also arise from the self-scattering of the thermal emission of dust grains. In this

rebbero diretti radialmente dalla stella. La polarizzazione, tuttavia, può anche derivare dal *self-scattering* (autodiffusione) dell'emissione termica dei grani di polvere. In questo caso i modelli mostrano che la polarizzazione è massima per uno *scattering* ad angolo retto rispetto alla direzione della radiazione incidente sul grano (vedi Fig.1, riquadro a sinistra). Le simulazioni mostrano che data la distribuzione della polvere e la sua temperatura nel disco, il *self-scattering* produce profili di polarizzazione dipendenti dall'orientazione del disco: in particolare, se il disco è inclinato rispetto alla linea di vista, i vettori di polarizzazione risultano essere paralleli all'asse minore apparente del disco. Un terzo effetto che produce un'emissione polarizzata è l'allineamento di grani non sferici con un campo di radiazione anisotropo. Per un disco illuminato centralmente dalla stella, la polarizzazione lineare presenterebbe per questo meccanismo un profilo circolare centrato sulla sorgente.

In questo quadro, un team di astronomi guidati dall'autrice di questo articolo, che include anche ricercatori dell'INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri, ha avviato un progetto per investigare le proprietà di polarizzazione dei dischi protoplanetari con getti bipolari associati, in sistemi per i quali erano note le proprietà di rotazione sia del disco che dei getti (Bacciotti et al. 2018). Un primo obiettivo era la determinazione della configurazione magnetica di queste sorgenti, per convalidare i modelli di lancio dei jet. Un secondo obiettivo era lo studio delle proprietà della polvere in questi dischi parzialmente evoluti. Sono state osservate con ALMA le stelle di pre-sequenza principale DG Tau e CW Tau, nella regione di formazione stellare del Toro (a distanza di ~140 pc). Sono stati analizzati i dati

case, the models show that maximum polarization is at right angles with respect to the direction of the incident radiation on the grain (see Fig. 1, left panel), while simulations show that given the distribution and temperature of the dust in the disk, self-scattering produces very specific patterns with respect to disk orientation. In particular, if the disk is inclined with respect to the line of sight, the polarization vectors turn out to be parallel to the apparent minor axis of the disk. A third effect producing polarized emission is the alignment of non-spherical grains with an anisotropic radiation field. For a centrally illuminated disk, the linear polarization would present for this mechanism a circular pattern centered on the source.

In this framework, a team of astronomers led by the author and including other researchers at the INAF-Arcetri Astrophysical Observatory started a project to map the polarization properties of protoplanetary disks with associated jets, in systems for which the rotation properties of both the disk and the jets were known (Bacciotti et al. 2018). A first aim was the determination of the magnetic configuration for these targets, in order to test the jet launch models. A second aim was the investigation of the dust properties in these partially evolved disks. Using ALMA, we observed the pre-main-sequence stars DG Tau and CW Tau in the Taurus star formation region (distance of ~140 pc). We analyzed ALMA Band 7 (centered at 870 μm) polarimetric data at 0."2 resolution, corresponding to a linear scale of about 30 au on the targets. The observed polarization (Fig. 1 central and right panels) does not correspond to an ordered magnetic structure. Rather, the alignment of the polarization vectors with the minor axis of the disks shows that self-scattering of dust thermal emission is the dominant polarization mecha-

polarimetrici nella banda 7 di ALMA (centrata a $870 \mu\text{m}$) con una risoluzione di $0.''2$, corrispondente a circa 30 au sulle sorgenti. La polarizzazione osservata (Fig. 1, pannelli centrale e destro), non è correlata ad una struttura magnetica ordinata. Invece, l'allineamento dei vettori di polarizzazione con l'asse minore dei dischi mostra che il *self-scattering* dell'emissione termica della polvere è il meccanismo di polarizzazione dominante. Questo è un risultato comune per i dischi protoplanetari alla lunghezza d'onda esaminata. Per fortuna però, anche se in questo caso non si possono ricavare informazioni sul campo magnetico, i dati di polarizzazione si rivelano un potente strumento per la diagnostica delle proprietà e dell'evoluzione delle polveri.

Confrontando i dati di polarizzazione con i modelli di *self-scattering* (ad esempio Kataoka et al. 2017, Yang et al. 2017) si può arrivare ad una stima della dimensione massima dei grani di polvere. Questa risulta essere nell'intervallo $50\text{-}70 \mu\text{m}$ per DG Tau e $100\text{-}150 \mu\text{m}$ per CW Tau. Inoltre, l'asimmetria dell'intensità della luce polarizzata in DG Tau indica che questo disco ha un grande spessore e forma svasata. Al contrario, la mappa di CW Tau, che presenta un picco centrale nell'intensità della luce polarizzata, indica che qui i grani si sono depositati sul piano mediano del disco. Infine, nel disco di DG Tau (Fig. 1, centro), oltre $0.''3$ dalla sorgente, si vede una struttura ad anello, dove cambia l'orientazione della polarizzazione. Nessuna struttura nell'emissione totale della polvere si trova investigando alla stessa risoluzione spaziale, ma un recente studio ha rivelato la presenza di un anello nell'emissione della molecola di formaldeide (H_2CO) il cui bordo interno è coincidente con la variazione delle proprietà di polarizzazione

nism. This represents a common result for protoplanetary disks at the examined wavelength.

Fortunately, however, even if no information on the magnetic field can be derived in this case, polarization data prove to be a powerful tool for the diagnostics of the properties and evolution of dust. Comparing the polarization data with the self-scattering models (e.g. Kataoka et al. 2017, Yang et al. 2017), we can estimate the maximum grain size, which we find to be in the $50\text{-}70 \mu\text{m}$ range for DG Tau and $100\text{-}150 \mu\text{m}$ for CW Tau. Furthermore, the asymmetry of the polarized intensity in DG Tau shows that this disk is flared. By contrast, the centrally peaked polarized intensity map of CW Tau indicates that here the grains have settled onto the disk midplane. Finally, in the DG Tau disk (Fig.1, center), beyond $0.''3$ from the source, one finds a ring structure in the polarized emission where the orientation of the polarization pattern changes. No substructure in the total emission of the dust is found at the same spatial resolution, but a recent study has revealed the presence of a ring in the emission of formaldehyde (H_2CO) with the inner border coincident with the change in the polarization properties (Podio et al. 2020). This demonstrates that polarization maps can point to hidden structural peculiarities. In summary, our research confirms that polarimetry at high angular resolution proves to be a new powerful tool in studies of the evolution of protoplanetary disks.

Bibliography

Bacciotti, F., Girart, J. M., Padovani, M., et al. 2018, ApJL 865, L12

(Podio et al. 2020). Ciò dimostra che le mappe di polarizzazione possono indicare peculiarità strutturali nascoste. In sintesi, il nostro studio conferma che la polarimetria ad alta risoluzione angolare si sta rivelando come un nuovo potente strumento per gli studi sull'evoluzione dei dischi protoplanetari.

Bibliografia

- Bacciotti, F., Girart, J. M., Padovani, M., et al. 2018, ApJL 865, L12
 Kataoka, A., Tsukagoshi, T., Pohl, A., et al., 2017, ApJL 844, L5
 Podio, L., Garufi, A, Codella, C. et al. 2020, A&A 644, 119
 Yang, H., Li, Z.-Y., Looney, L. W., Girart, J. M., Stephens, I. W., 2017, M.N.R.A.S. 472, 373

Francesca Bacciotti. Astronoma all'Osservatorio Astrofisico di Arcetri, si occupa dei fenomeni di outflow in formazione stellare e di struttura dei dischi protoplanetari, lavorando con osservazioni ad alta risoluzione angolare e modelli magneto-idrodinamici.

- Kataoka, A., Tsukagoshi, T., Pohl, A., et al., 2017, ApJL 844, L5
 Podio, L., Garufi, A, Codella, C. et al. 2020, A&A 644, 119
 Yang, H., Li, Z.-Y., Looney, L. W., Girart, J. M., Stephens, I. W., 2017, M.N.R.A.S. 472, 373

Francesca Bacciotti is an astronomer at the Arcetri Astrophysical Observatory. She investigates outflow phenomena and protoplanetary disks in star formation regions, with observations at high angular resolution and magneto-hydrodynamic models.

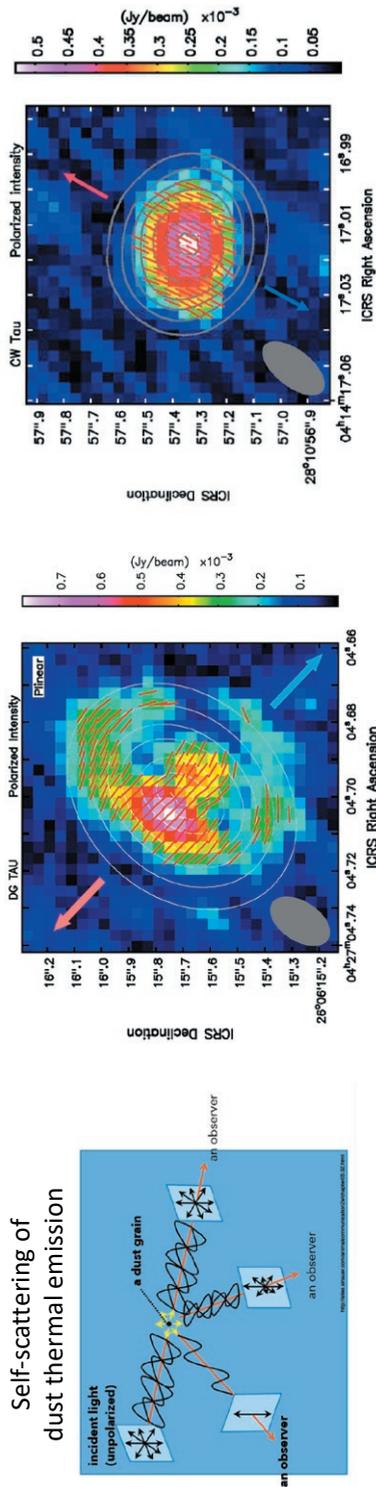


Figure 1. A sinistra: meccanismo di *self-scattering* della radiazione termica della polvere: la polarizzazione è massima per un angolo di *scattering* di 90° . Centro: intensità della radiazione polarizzata linearmente nel disco attorno a DG Tau (mappa di colori), con sovrapposti vettori di polarizzazione (segmenti di lunghezza fissa) e curve di livello dell'intensità totale. A destra: analogo al pannello centrale, per il disco attorno a CW Tau (Bacciotti et al. 2018). L'allineamento del pattern di polarizzazione lungo l'asse minore dei dischi indica che la polarizzazione si deve al *self-scattering* della polvere. In DG Tau, la maggiore intensità della luce polarizzata sul lato del disco vicino all'osservatore, indicato dal lobo in allontanamento del getto (freccia rossa), suggerisce una geometria del disco a forma svasata.

Figure 1. Left: Mechanism of dust self-scattering of thermal radiation: polarization is at a maximum for a scattering angle of 90° . Center: linearly polarized intensity in the DG Tau disk (color map), with superposed polarization vectors (fixed length segments) and contours of the total intensity. Right: Same as central panel for the CW Tau disk (Bacciotti et al. 2018). The alignment of the polarization pattern along the minor axis of the disks supports polarization from dust self-scattering. In DG Tau, the higher polarized intensity measured toward the disk near-side, indicated by the receding jet lobe (red arrow), suggests a flared disk geometry.