



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Unveiling the third dimension: vertical structure as a probe of planet formation conditions

Paneque Carreño, T.

Citation

Paneque Carreño, T. (2024, September 13). *Unveiling the third dimension: vertical structure as a probe of planet formation conditions*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4083418>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4083418>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Resumen en Castellano

En el norte de Chile, debido a sus condiciones naturales y aislamiento, el desierto de Atacama es una ventana única para observar el universo. Durante muchos siglos, las comunidades indígenas locales, llamados en su idioma *Lickan Antay* y en castellano actual *Atacameños*, miraban al universo y se enfocaban no solo en las estrellas brillantes, sino en las áreas oscuras que contrastaban con el resplandor. Ahora sabemos que estas regiones son oscuras porque pequeños granos de polvo absorben la luz estelar en frecuencias ópticas y que estas nubes oscuras están asociadas con regiones de formación estelar. Mientras que nuestros ojos no pueden ver más allá del polvo, instrumentos como el Atacama Large Millimeter/submillimeter Array pueden revelar sus secretos. ALMA está construido en el llano de Chajnantor, un lugar sagrado para los *Lickan Antay* en el desierto de Atacama, que en su idioma significa “lugar de partida”. Ubicado a una altitud de 5000 metros, uno de los principales objetivos científicos de ALMA es investigar estas regiones oscuras y frías para entender los procesos que conducen a la formación de estrellas y planetas.

El análisis y los resultados presentados en esta tesis han sido posibles gracias a las capacidades de ALMA, que desde el inicio de sus operaciones en 2013 ha revolucionado la visión sobre la formación de planetas. A través de observaciones y el estudio teórico del universo a longitudes de onda (sub-)milimétricas, tenemos una oportunidad única de mirar hacia nuestros orígenes. ¿Cómo se formó la Tierra? ¿Podrían otros sistemas planetarios tener condiciones similares? ¿Cuáles son los procesos clave que rigen estas épocas iniciales?

Formación de estrellas y planetas

El proceso de formación de planetas está intrínsecamente ligado a la formación estelar. Primero las estrellas se forman a partir de nubes moleculares que colapsan contrayéndose y creando un núcleo pre-estelar. Pasando de núcleo hasta sistema planetario, los objetos estelares jóvenes (YSO) se clasifican en Clases (0, I, II o III). En la fase más temprana de Clase 0/I, la protoestrella estará activamente acumulando material de una envoltura protoestelar alrededor de ella, luego, debido a la conservación del momento angular, el material circundante se extenderá para crear una estructura en forma de disco rotatorio alrededor del sistema proto-

estelar. Estos discos se denominan discos protoplanetarios, ya que son los lugares de nacimiento y albergan el reservorio de material de futuros sistemas planetarios.

La fase de disco protoplanetario se conoce como Clase II, dura entre 1-10 millones de años y termina cuando la mayor parte del material del disco ha caído hacia la estrella, formando planetas o se dispersado, tras lo cual se revela un sistema planetario de Clase III. Esta tesis se centra en la fase de disco protoplanetario, donde el material primordial puede ser observado en alta resolución a longitudes de onda (sub-)milimétricas.

Discos protoplanetarios

Al igual que sus nubes moleculares progenitoras, los discos protoplanetarios son estructuras ricas en gas con apenas un pequeño porcentaje de su masa correspondiente a partículas sólidas (polvo). La mayor parte del material gaseoso del disco es hidrógeno molecular (H_2), sin embargo, su emisión es extremadamente débil e inaccesible con los telescopios actuales. El monóxido de carbono (CO) es la segunda molécula más abundante después de H_2 y es frecuentemente detectado, lo cual lo convierte en un trazador preferido del reservorio total de material. Otros trazadores comúnmente observados en discos protoplanetarios son: CN , HCN , H_2CO , CS , HCO^+ , N_2H^+ , H_2O y C_2H .

La Figura 6 presenta la distribución radial y vertical del material dentro de un disco protoplanetario, junto con las principales características y procesos en curso. Radialmente, el disco se divide en un caliente disco interior ($<20\text{ua}$) y un disco exterior frío. Las observaciones de ALMA pueden acceder al disco exterior con una resolución espacial de unas pocas unidades astronómicas. Comprender la morfología, propiedades y dinámica de cualquier subestructura radial, azimutal o vertical es un objetivo clave de los estudios de formación de planetas para investigar directamente los procesos en curso a través de dichas estructuras.

En sus dimensiones verticales, los discos tienen una extensión que está determinada por el equilibrio hidrostático. Esto significa que la distribución del material en el eje vertical será moldeada por el equilibrio entre el potencial gravitacional de la estrella y el soporte térmico del material. Por lo tanto, la distribución vertical de los discos protoplanetarios contiene información sobre propiedades físicas clave, como la estructura térmica y de densidad. La estructura vertical también puede utilizarse como una sonda para el campo de ionización y la presencia de inestabilidades hidrodinámicas y vientos. Sin embargo, estudiar observacionalmente la dimensión vertical en muestras amplias de discos solo ha sido posible en los últimos años y, en particular, a través de los resultados de esta tesis.

Estudio de la estructura vertical del disco

El acceso a la dimensión vertical de los discos protoplanetarios con ALMA dependerá del ángulo de inclinación con el que sean vistos desde la Tierra. Hay dos casos extremos; 1) discos vistos de canto con altas inclinaciones ($\gtrsim 75^\circ$) y 2) discos vistos de frente con bajas inclinaciones ($\lesssim 35^\circ$). En ambos casos solo se puede acceder a dos dimensiones, para los discos vistos de canto, las dimensiones vertical

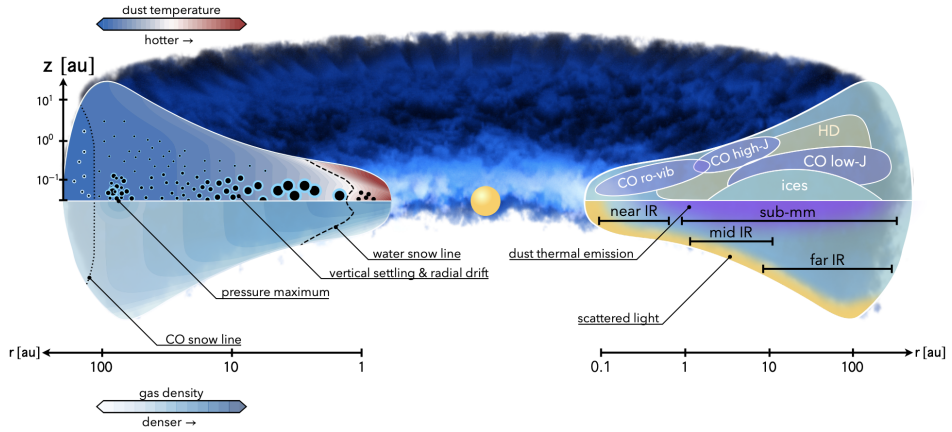


Figura 5: Ilustración de Miotello et al. (2023) que indica las regiones de emisión, escalas relevantes, temperatura del polvo y estructura de densidad del gas en discos protoplanetarios. El lado izquierdo muestra la distribución de partículas de polvo con círculos negros de diferentes tamaños. El lado derecho presenta una vista simplificada de la estratificación molecular para las principales moléculas en fase gaseosa. En la parte inferior se destacan las regiones de emisión térmica y de luz dispersa del polvo en púrpura y amarillo.

y radial, y para los discos vistos de frente, las dimensiones radial y azimutal. El resto de la muestra de discos protoplanetarios, con inclinaciones observadas entre $\sim 35\text{-}70^\circ$, se clasifican como discos de inclinación media. Nuestro trabajo se centra en estas fuentes, ya que permiten una vista de los procesos en curso en toda su estructura tridimensional, incluyendo el eje vertical. La Figura 4 muestra cada uno de las clasificaciones según inclinación.

En los discos de inclinación media observados por ALMA, la dimensión vertical puede ser sondeada directamente a través de los mapas de canales de emisión trazando los máximos de emisión, como se muestra en el panel derecho de la Figura 4. Esta metodología es sensible a cualquier subestructura o asimetría que pueda estar presente y ha sido implementada en algoritmos públicos como ALFAHOR (ver Capítulo 3 de esta Tesis).

Las aplicaciones inmediatas de medir las capas moleculares verticales en discos protoplanetarios son varias, dependiendo de los trazadores seleccionados, la resolución y la información disponible de cualquier estructura radial o azimutal. La estructura termal del disco puede ser trazada a través de la temperatura de brillo de los isotopólogos de CO, ofreciendo información fundamental para la calibración de modelos termodinámicos y mediciones de temperatura precisas, que son críticas en estudios de turbulencia (ver el Capítulo 4 de esta tesis para una aplicación). Si existe información cinemática, los métodos actuales permiten separar las componentes radiales, azimutales y verticales del movimiento del material, combinando esto con la ubicación de las superficies verticales es posible trazar y estudiar directamente la presencia de movimientos meridionales o vientos, que son cruciales

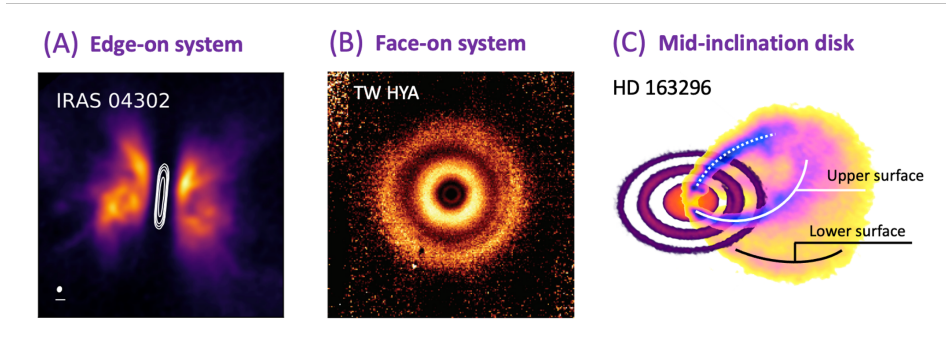


Figura 6: Tres sistemas de discos protoplanetarios con diferentes inclinaciones. Para IRAS 04302 los colores rastrean la distribución de pequeños granos de polvo, que están bien acoplada al gas, y los contornos blancos muestran el disco en emisión milimétrica (van't Hoff et al. 2020). TW Hya ha sido observado en el milimétrico con ALMA (Andrews 2020). HD 163296 muestra los anillos en emisión milimétrica de ALMA, que rastrea el plano medio del disco. Además la figura muestra un solo canal de gas CO donde las superficies de emisión superior e inferior se extienden verticalmente.

para entender la dinámica del disco. Recientemente, la ubicación vertical del carbono atómico está siendo utilizada para comprender la ubicación de la superficie irradiada del disco y las propiedades de esta región.

Esta tesis

Reconociendo la importancia de caracterizar la estructura vertical del disco protoplanetario para comprender las condiciones y procesos que rigen la formación de planetas, la siguiente tesis plantea un análisis observacional y teórico en profundidad de la dimensión vertical. A continuación se presenta un resumen de los próximos capítulos y conclusiones de este trabajo,

Capítulo 2: Vertically extended and asymmetric CN emission in the Elias 2-27 protoplanetary disk. Analizamos CN $N = 3 - 2$ en dos transiciones diferentes y lo comparamos con la emisión de isotopólogos de CO. Nuestros resultados muestran que la ubicación vertical de CN y CO en Elias 2-27 está estratificada y es consistente con las predicciones de los modelos termodinámicos. Las densidades de columna de CN inferidas, la baja profundidad óptica ($\tau \leq 1$) y la ubicación cerca de la superficie del disco coinciden con los modelos termodinámicos de disco donde la formación de CN se inicia por la reacción de N con H_2 bombeado por UV. Este estudio destaca la importancia de trazar la ubicación vertical de varias moléculas para restringir las condiciones físicas del disco.

Capítulo 3: Directly tracing the vertical stratification of molecules in protoplanetary disks. Se presenta el código ALFAHOR, que es una implementación del método de Pinte et al. (2018a) y obtiene perfiles verticales precisos

incluso para moléculas con baja señal-a-ruido utilizando el enmascaramiento interactivo de canales de emisión. Usando ALFAHOR estudiamos las superficies de emisión molecular de Elias 2-27, WaOph 6 y las cinco estrellas del Programa MAPS de ALMA. Se discuten la estructura termal, las escalas de presión de gas, las subestructuras y modulaciones en los perfiles verticales y las relaciones con el origen químico de cada molécula observada. En general, mostramos que es posible trazar las ubicaciones verticales de múltiples especies moleculares y relacionar esta información con una amplia variedad de propiedades físicas y químicas del disco.

Capítulo 4: High turbulence in the IM Lup protoplanetary disk. Direct observational constraints from CN and C₂H emission. Determinar el grado de turbulencia en los discos es clave para entender sus procesos de evolución, sin embargo, su medición depende de conocer las condiciones térmicas de la emisión molecular. Combinando la información sobre la estructura termal que se puede obtener del análisis de la estructura vertical, presentamos una nueva forma de medir directamente la turbulencia. Este método se calibra utilizando la emisión molecular de CN y C₂H del disco protoplanetario de IM Lup. Nuestro análisis recupera una turbulencia alta de Mach 0.4-0.6 en $z/r \sim 0.25$. Este estudio presenta la primera evidencia empírica de un gradiente vertical en la turbulencia del disco, que es una predicción clave de la inestabilidad magneto-rotacional.

Capítulo 5: Vertical CO surfaces as a probe for protoplanetary disk mass and carbon depletion. Utilizando modelos termodinámicos estudiamos las propiedades del disco protoplanetario y de la estrella anfitriona que más afectan la ubicación vertical de las superficies de emisión de CO $J = 2 - 1$. Las predicciones de los modelos se calibran con los datos de emisión de CO de diecinueve discos. Determinamos que la superficie de emisión de CO es principalmente afectada por la masa total del disco (M_d) y la abundancia de carbono volátil, lo que conduce a una relación z/r - M_d . Para reconciliar las estimaciones de masa total del disco a partir del z/r característico y los valores obtenidos en base al análisis del polvo en longitudes milimétricas, se necesita una disminución de carbono volátil de 10-100 (con respecto al ISM) para la mayoría de las fuentes.

Perspectivas Futuras

Los estudios de la estructura vertical del disco en grandes muestras están en etapas tempranas, hasta la fecha solo ~ 20 discos tienen superficies verticales de CO caracterizadas y ~ 8 (Paneque-Carreño et al. 2023; Law et al. 2024) tienen perfiles verticales medidos en más de tres moléculas diferentes. El trabajo de esta tesis ha demostrado que es posible utilizar observaciones de ALMA para estudiar la estratificación molecular en el eje vertical y relacionarla con una serie de procesos físicos.

El trabajo futuro debe centrarse en expandir la muestra de discos con análisis de sus superficies moleculares y combinar la información química con el conocimiento de la distribución de granos de polvo para caracterizar con precisión los procesos del disco. Esto requiere observaciones de alta resolución espacial y es-

pectral de moléculas más allá del CO, que generalmente requieren mayor tiempo de integración debido a la baja señal-a-ruido de trazadores menos abundantes. La pronosticada actualización de la sensibilidad de banda ancha de ALMA en la próxima década nos permitirá realizar estos estudios en menos tiempo y para muestras más grandes.

En general, la posibilidad de estudiar la distribución de material del disco protoplanetario en las tres dimensiones ofrece una visión única del proceso de formación de planetas. La calidad e información entregada por las observaciones están alcanzando la precisión de los modelos teóricos, que deben revisarse para explicar la totalidad de las características observadas. De la misma manera que en los últimos años los estudios se han centrado en explicar la existencia de subestructuras radiales y azimutales, ahora debemos mirar la tercera dimensión y comprender la información que proviene de ella. Las técnicas y resultados de esta tesis han sentado las bases para muchos estudios futuros que seguramente responderán las preguntas que ahora dejamos abiertas.