



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## **Linking simple molecules to grain evolution across planet-forming disks**

Salinas Poblete, V.N.

### **Citation**

Salinas Poblete, V. N. (2017, December 18). *Linking simple molecules to grain evolution across planet-forming disks*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/59500>

Version: Not Applicable (or Unknown)

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/59500>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The following handle holds various files of this Leiden University dissertation:  
<http://hdl.handle.net/1887/59500>

**Author:** Salinas Poblete V.N.

**Title:** Linking simple molecules to grain evolution across planet-forming disks

**Issue Date:** 2017-12-18

# Resumen en Español

La humanidad se ha preguntado siempre sobre su origen y lugar en el Universo. Nuestros ancestros observaron los cielos en busca de respuestas. Incontables mitos y leyendas han permeado a través de las grandes civilizaciones del pasado, y han servido de explicación para las preguntas fundamentales sobre el origen del Universo y los seres humanos. Ha sido tan solo recientemente que la astrofísica moderna intentó emplear el pensamiento racional para explicar el origen de la Tierra y la vida dentro del Sistema Solar.

La teoría de formación estelar (y planetaria) más ampliamente aceptada comienza con una nube molecular de gas y polvo gravitacionalmente inestable. Mientras la nube colapsa bajo su propia gravedad, un disco se forma rápidamente a medida que material lejano con grandes cantidades de rotación (o momento angular, como es conocido en física) se desploma hacia el centro del sistema. Este disco está inicialmente inserto en una envoltura de gas y polvo. Luego de  $\sim 0.5$  millones de años esta envoltura es disipada por chorros y flujos bipolares, generados por la estrella central, que crean una cavidad en la envoltura dejando atrás un disco. Es en este disco circumestelar donde los planetas se forman, llevando así el nombre de disco protoplanetario. Estos discos han sido descubiertos alrededor de muchas estrellas jóvenes en distintas etapas evolutivas con propiedades físicas y químicas muy diferentes.

El contenido de gas y polvo de los discos protoplanetarios puede explorarse observando las líneas espectrales de las moléculas en estado gaseoso y la radiación térmica emitida por el polvo, lo que da como resultado un espectro continuo. Durante su tiempo de vida típico de  $\sim 10$  millones de años, el disco se somete a muchos procesos dinámicos que transforman su estructura, conduciendo eventualmente a la formación de planetas y a la disipación de su contenido gaseoso. Adicionalmente, los discos protoplanetarios presentan una química diversa impulsada principalmente por la radiación ultravioleta y de rayos X que puede estar intrínsecamente conectada a la evolución física de los componentes del disco (ver Fig.9.1). El objetivo de esta tesis es proporcionar una explicación para la morfología que se observa en la emisión de especies moleculares portadoras de nitrógeno, oxígeno y carbono mediante su comparación con la morfología del perfil de densidad del polvo. En particular, esta tesis busca responder dos preguntas:

- ¿Dónde están ubicadas las principales especies portadoras de oxígeno y nitrógeno, concretamente agua y amoníaco, dentro de los discos formadores de planetas?
- ¿Cómo se relacionan las estructuras físicas, tales como los gradientes de temperatura y las subestructuras en la densidad del polvo causadas por los procesos de crecimiento granular, con la formación y la química de moléculas comunes?

## Esta Tesis

El Capítulo 1 de esta tesis ofrece una introducción general a la teoría de formación estelar y a los discos protoplanetarios, con énfasis en el proceso de evolución del polvo y los diferentes regímenes químicos dentro de los discos. El análisis se centra en dos discos protoplanetarios bien estudiados, TW Hya y HD 163296. Ambos objetos son excelentes laboratorios debido a su proximidad y sus brillantes y masivos discos. Esta tesis utiliza datos infrarrojos del *Telescopio Espacial Herschel* y datos (sub)milimétricos del Gran Conjunto Milimétrico de Atacama (ALMA por sus siglas en inglés). *Herschel* estaba equipado con un único espejo de 3.5 metros y tenía tres instrumentos a bordo que cubrían longitudes de onda desde  $\sim 50 \mu\text{m}$  a  $\sim 600 \mu\text{m}$ . En este trabajo se usaron los datos del programa clave “Agua en las regiones de formación estelar con Herschel” (WISH, por sus siglas en inglés), tomados con el instrumento HIFI a bordo de *Herschel*. ALMA es un radiotelescopio que consta de sesenta y seis antenas con una resolución espacial y sensibilidad sin precedentes que se utilizó para observar tanto la emisión molecular como el espectro continuo de los dos objetos seleccionados.

El Capítulo 2 utiliza observaciones de ALMA a una longitud de onda de 1.3 mm para investigar dónde se encuentran los granos de aproximadamente 1 mm de tamaño en el disco alrededor de TW Hya. En los discos formadores de planetas, los granos pequeños ( $\sim \mu\text{m}$ ) se unen y se convierten en granos más grandes (mm, cm y mayores) para finalmente formar planetas. Mientras que los granos pequeños con tamaños aproximados de  $\mu\text{m}$  están bien acoplados al gas, los granos más grandes se desplazan hacia el centro del disco debido a la fricción con el gas. Las observaciones muestran que los granos de tamaño milimétrico

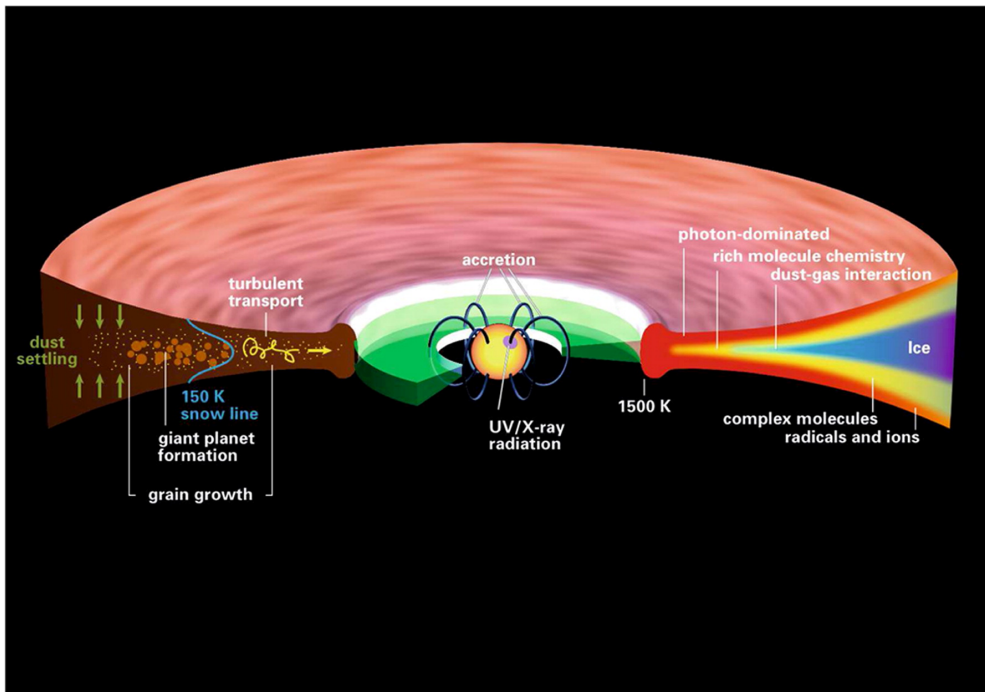


Figure 9.1: Caricatura de la evolución del polvo y las diferentes regiones químicas de un disco protoplanetario. Figura de Henning & Semenov (2013).

se encuentran hasta  $\sim 47$  AU de la estrella central. A distancias más largas su cantidad disminuye rápidamente. Esta pronunciada caída se ha predicho, mediante cálculos teóricos, como consecuencia del crecimiento de los granos de polvo y su transporte en el disco. Sin embargo, para modelos de evolución de polvo realistas que son típicos de discos T Tauri, la extensión observada de los granos y su cantidad total son demasiado grandes para un disco de 8-10 millones de años de vida. Posibles explicaciones para esta aparente contradicción incluyen una masa y tamaño del disco inicial mucho mayor, una brecha en la densidad de polvo que detiene la migración radial del polvo de tamaño milimétrico abierta por un compañero planetario invisible o una sobreproducción local de granos de tamaño milimétrico generada por la presencia de granos cubiertos de hielo que crecen más eficientemente que los granos sin hielo en regiones donde el CO está congelado.

El Capítulo 3 presenta la primera detección de amoníaco en un disco formador de planetas. La línea  $o\text{-NH}_3$   $1_0\text{-}0_0$  fue observada con el instrumento HIFI a bordo de *Herschel* junto con las líneas de emisión de  $o\text{-H}_2\text{O}$  y  $p\text{-H}_2\text{O}$  en el disco alrededor de TW Hya. Cuatro modelos diferentes para la distribución de estas moléculas fueron explorados, asumiendo que los hielos de agua y amoníaco se entremezclan y se liberan al medio gaseoso simultáneamente. Solo la distribución más compacta y decantada tanto del agua como del amoníaco en estado gaseoso, siguiendo la extensión radial de la emisión del continuo milimétrico de  $r \lesssim 60$  AU, es consistente con la razón amoníaco/agua encontrada en el gas entre las estrellas de nuestra galaxia y cuerpos del Sistema Solar de  $\sim 5\%$ - $10\%$ . Otras configuraciones, a radios o alturas mayores, solo se pueden conciliar con los valores interestelares y del Sistema Solar si se invocan vías de formación adicionales para el amoníaco. La reserva de amoníaco y agua derivada de su estado gaseoso en cualquiera de estos modelos es solo una pequeña fracción de la reserva total, lo que indica que la mayoría de estas moléculas están contenidas en granos con hielo.

Se piensa que el gas frío de los discos formadores de planetas alberga una gran cantidad de especies portadoras de deuterio, como  $\text{NH}_2\text{D}$ . El Capítulo 4 analiza los datos de *Herschel* de la línea  $o\text{-NH}_3$   $1_0\text{-}0_0$  y los datos de ALMA de la línea  $p\text{-NH}_2\text{D}$   $1_0\text{-}0_0$  del disco alrededor de HD 163296. Ambas observaciones no pudieron detectar las líneas de emisión dado sus modestos tiempos de integración. Este Capítulo explora dos distribuciones radiales diferentes de  $o\text{-NH}_3$  y  $p\text{-NH}_2\text{D}$  en su estado gaseoso para poner límites en sus intensidades de línea y masas totales. Los límites superiores derivados para la masa total de  $o\text{-NH}_3$  y  $p\text{-NH}_2\text{D}$  en su estado gaseoso en este disco son diez veces inferiores a los valores en el disco de similar masa alrededor de TW Hya, de acuerdo al modelo preferido derivado en el Capítulo 3, asumiendo una razón  $\text{NH}_3/\text{NH}_2\text{D}$  de un 10%. Esto sugiere que el disco alrededor de HD 163296 es pobre en  $\text{NH}_3$  por un factor no menor a 5 en comparación con el disco alrededor de TW Hya. Otras especies portadoras de nitrógeno detectadas hacia estos discos muestran cantidades relativas diferentes a las encontradas para el amoníaco. Esto sugiere que la diferencia observada en la masa total de  $o\text{-NH}_3$  en su estado gaseoso entre estos discos se debe a su vía de formación y no a una falta general de nitrógeno elemental.

El Capítulo 5 se enfoca en el análisis y caracterización radial de tres especies deuteradas simples en un disco formador de planetas. Las líneas de emisión de  $\text{DCO}^+$ ,  $\text{DCN}$ , y  $\text{N}_2\text{D}^+$  se observaron y detectaron con ALMA en el disco alrededor de HD 163296. Este capítulo traduce el perfil de emisión radial de estas tres moléculas a densidades radiales bajo suposiciones que simplifican su cálculo. La emisión radial de  $\text{DCO}^+$  puede ser reproducida por un modelo con tres regiones radiales consecutivas y diferentes abundancias constantes desde  $\sim 50$  AU a  $\sim 316$  AU con dos saltos radiales en  $\sim 118$  AU y  $\sim 245$  AU. Las dos primeras regiones radiales del modelo que mejor reproduce la emisión de  $\text{DCO}^+$  se correlacionan

espacialmente con los modelos que mejor describen los perfiles de emisión radial de DCN y  $N_2D^+$ . Esto puede interpretarse como un reflejo del hecho de que hay múltiples formas de inyectar deuterio en la química. Una de estas rutas es solo activada a temperaturas bajas y produce  $N_2D^+$ ; la otra opera a temperaturas ligeramente más altas y produce DCN.  $DCO^+$  se forma a través de ambas rutas. El origen de la tercera región de emisión  $DCO^+$  a  $\sim 260$  AU es incierto, pero podría estar correlacionado con temperaturas altas permitiendo que el CO se evapore a distancias lejanas, donde puede reaccionar para formar  $DCO^+$ .

El Capítulo 6 trata de reproducir la emisión de  $DCO^+$  presentada en el Capítulo 5 usando una sencilla red de reacciones químicas, pero un poco más sofisticada que el tratamiento del Capítulo 5, para la formación de  $DCO^+$  en ambientes fríos y un modelo paramétrico para su formación en ambientes más cálidos. La emisión de  $DCO^+$  puede ser reproducida por un modelo con una abundancia de CO de  $2 \times 10^{-7}$ , en regiones donde la temperatura del gas excede los 19 K, y una contribución de la formación de  $DCO^+$  en ambientes más cálidos del 20% en regiones donde ambas vías de formación están activas. A mayores distancias de la estrella central, la extensión y forma de la emisión de  $DCO^+$  puede reproducirse considerando un gradiente de temperatura similar a los predichos por los modelos de evolución y crecimiento de los granos de polvo en presencia de migración radial de los granos de tamaño milimétrico hacia el centro del sistema.

## Conclusiones generales

El análisis presentado en los Capítulos 3 & 4 proporciona una respuesta a la primera pregunta que esta tesis trató de responder. El agua y amoníaco en estado gaseoso alrededor de TW Hya siguen la estructura espacial de sus reservas de hielo. Estas reservas se encuentran atrapadas en cuerpos grandes que se han asentado y desplazado hacia el centro del sistema. La ubicación de este reservorio es determinada por la migración radial de los granos de polvo que han experimentado algún crecimiento, y que posteriormente se incorporaron en rocas más grandes. Observaciones de  $NH_2D$  y HDO hacia TW Hya y HD 163296 podrían confirmar este escenario. Los Capítulos 5 & 6 sacan conclusiones sobre el efecto de las estructuras físicas del disco en la distribución de moléculas simples. Especies sensibles a la temperatura, como  $DCO^+$ , pueden rastrear las subestructuras en el perfil de temperatura de los discos formadores de planetas. Si bien el factor más importante en la estructura de la temperatura del disco es la iluminación por la estrella central, las subestructuras producidas por la evolución y crecimiento de los granos de polvo pueden modificar el perfil térmico del disco. Especies como  $DCO^+$  se pueden utilizar para rastrear indirectamente el impacto de la evolución y el crecimiento de los granos de polvo sobre la morfología del disco. El proceso inverso, es decir, el impacto de la ubicación de moléculas simples en la evolución del polvo, es estudiado en el Capítulo 2 comparando la forma de la emisión del continuo milimétrico y la ubicación de la *snowline* de las principales especies moleculares como por ejemplo el CO. Nuevos instrumentos de luz infrarroja y visible en instalaciones tales como el futuro Telescopio Espacial James Webb (JWST, por sus siglas en inglés) o el Telescopio Extremadamente Grande (ELT, por sus siglas en inglés) podrán observar moléculas clave en ambientes cálidos dentro del disco, características del hielo que cubre a los granos de polvo e imágenes espacialmente resueltas de luz en dispersión permitiendo distinguir los diferentes escenarios explorados en esta tesis. Observaciones de múltiples discos protoplanetarios podrían ayudar a promediar las diferencias entre fuentes individuales y dilucidar las tendencias generales en su estructura y evolución, conduciendo finalmente a una comprensión integral de los procesos involucrados en la formación de estrellas y planetas.