



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Dusty perspectives on the cradles of planets

Guerra Alvarado, O. M.

Citation

Guerra Alvarado, O. M. (2026, February 6). *Dusty perspectives on the cradles of planets*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4289494>

Version: Publisher's Version

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

License: <https://hdl.handle.net/1887/4289494>

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

Spanish summary

Vivimos en un pequeño rincón de nuestra galaxia, la Vía Láctea, dentro de un sistema planetario que llamamos el Sistema Solar. Durante mucho tiempo se creyó que nuestro sistema, o más concretamente la humanidad, era el centro del universo, una creencia que hoy sabemos que está lejos de la realidad. Si nacimos y crecimos aquí, no era descabellado imaginar que algo similar pudo haber ocurrido alrededor de otras estrellas en nuestra galaxia o incluso en galaxias distantes.

Curiosamente, el Sol ni siquiera es una estrella típica dentro de la Vía Láctea, y mucho menos en el universo. De hecho, evidencia reciente sugiere que la formación de nuestro Sistema Solar podría haber seguido un camino bastante inusual en comparación con la mayoría de otros sistemas planetarios. Aun así, el simple hecho de que sepamos de otras posibilidades y que la vida pueda surgir en otros lugares sigue siendo algo que nos intriga profundamente. Entonces: ¿qué llevó a la formación de este sistema planetario alrededor de una estrella como el Sol, que eventualmente permitió el surgimiento de la vida?

Para responder a esta pregunta, debemos retroceder hasta el nacimiento de estrellas, en las regiones más frías y oscuras del universo, donde el gas y el polvo interestelar se acumulan, el medio interestelar.

Formación de Estrellas y Planetas en el Medio Interestelar

En nuestro universo existen vastas regiones de gas y polvo conocidas como nubes moleculares, que constituyen una parte fundamental del

medio interestelar. Estas regiones son los lugares donde nacen las estrellas. Las nubes moleculares están compuestas principalmente por hidrógeno y helio, aunque también contienen pequeñas cantidades de elementos más pesados como oxígeno, nitrógeno y carbono. Cuando ciertas zonas de estas nubes alcanzan suficiente densidad y masa, la gravedad provoca su colapso, lo que da lugar a la formación de una protoestrella. El material colapsado comienza a calentarse y a aplanarse en una estructura giratoria. Este material aplanado que queda alrededor de la joven estrella forma lo que se conoce como un disco protoplanetario.

Dentro de este disco, las partículas de polvo comienzan a adherirse entre sí, formando cúmulos de partículas cada vez más grandes. Con el tiempo, estos cúmulos se convierten en cuerpos de varios kilómetros de tamaño, conocidos como planetesimales, que continúan creciendo hasta dar origen a planetas. Este proceso continúa hasta que se activan las reacciones nucleares en la protoestrella. La radiación que emite se vuelve tan intensa que empieza a dispersar el material restante del disco, dejando atrás únicamente los objetos más masivos: los planetas, planetesimales y, en definitiva, un sistema planetario completamente formado.

Este sistema puede permanecer estable durante millones o incluso miles de millones de años, hasta que la estrella agota su combustible nuclear. Dependiendo de su masa, la estrella puede explotar como una supernova o expandirse y terminar su vida como una enana blanca. En cualquiera de los casos, el material remanente es devuelto al medio interestelar, reiniciando así el ciclo de formación estelar. Este proceso se ilustra en la Figura 1.

Mientras que desde la Tierra podemos estudiar el pasado del sistema solar mediante meteoritos y registros geológicos, la mejor forma de comprender el origen de los planetas y la posibilidad de vida en otros lugares es observar discos protoplanetarios en formación. Estos sistemas se encuentran en nubes moleculares cercanas y nos ofrecen una ventana única a los inicios de la formación planetaria. Para estudiarlos, utilizamos telescopios potentes capaces de detectar la luz proveniente de las partículas

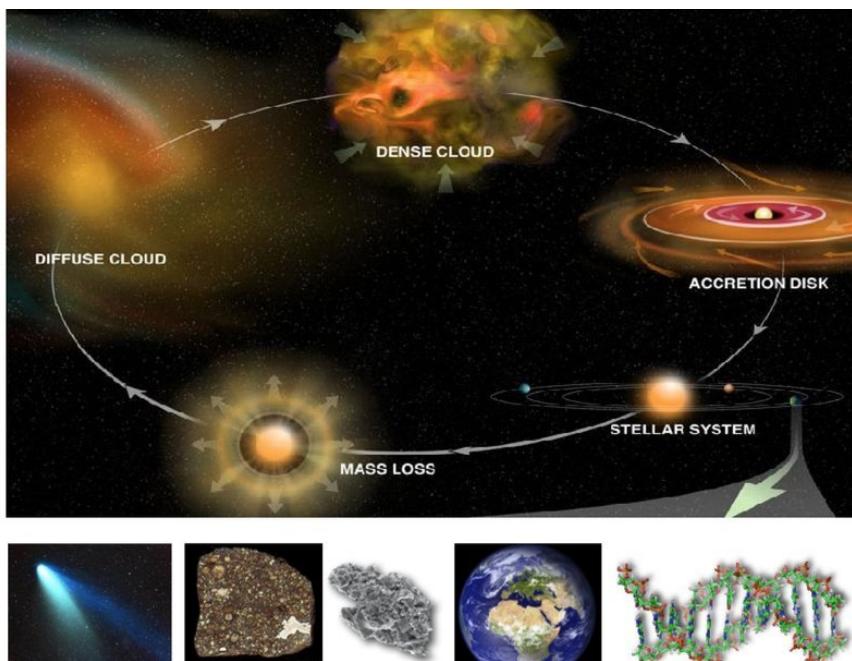


Figure 1: Esta imagen ilustra el proceso completo de formación estelar, junto con las primeras etapas de la formación planetaria. Todo comienza con una nube molecular, una región fría y densa de gas y polvo en el medio interestelar. Con el tiempo, partes de esta nube colapsan por efecto de la gravedad, formando una protoestrella rodeada por un disco de material en acreción. A medida que la protoestrella evoluciona, el disco protoplanetario circundante se convierte en el lugar de nacimiento de los planetas. Dentro de este disco, pequeñas partículas colisionan y se adhieren, formando granos de polvo y, eventualmente, planetas. Con el tiempo, gran parte del material del disco se disipa, dejando atrás un sistema planetario con moléculas orgánicas complejas, átomos y polvo residual. Crédito de la imagen: B. Saxton, NRAO/AUI/NSF

de polvo, átomos y moléculas en estos discos. En particular, los telescopios interferométricos nos permiten resolver su estructura con gran detalle, ayudándonos a entender los entornos donde nacen los planetas y posiblemente se origine la vida como la conocemos hoy.

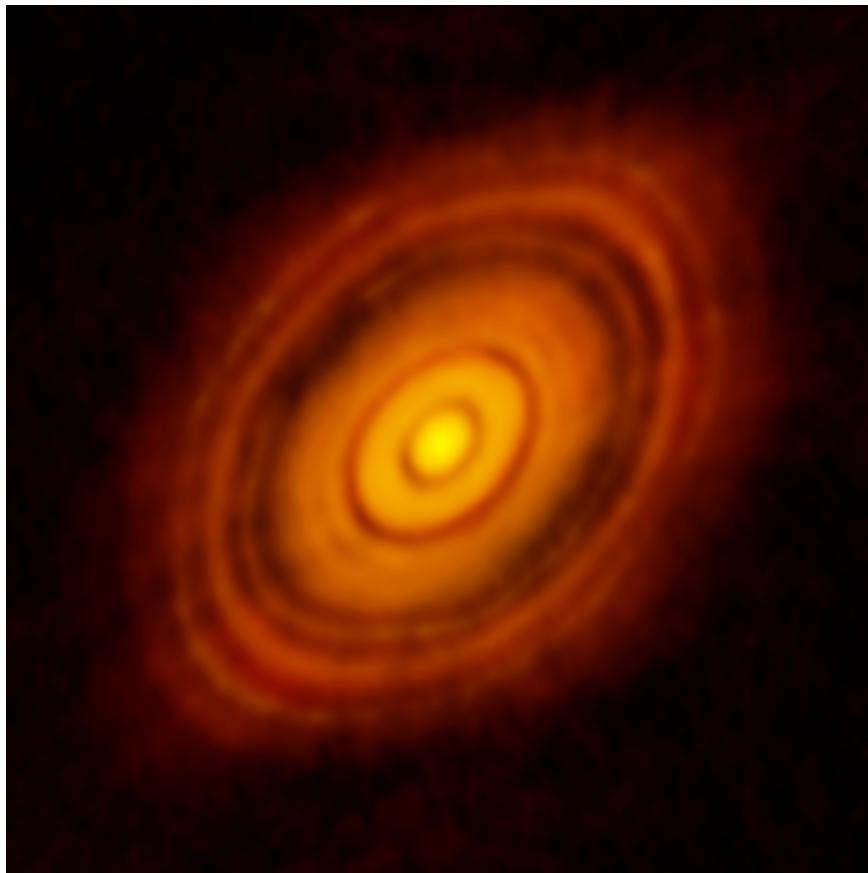


Figure 2: Esta imagen muestra cómo se ve una protoestrella con un disco protoplanetario cuando se observa con un telescopio como el Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) en longitudes de onda submillimétricas. El disco revela diversas características, incluidas anillos y huecos, a las que nos referimos como subestructuras. Estas pueden ser el resultado de la formación de planetas u otros procesos dinámicos dentro del disco. Crédito de la imagen: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO); C. Brogan, B. Saxton (NRAO/AUI/NSF)

Esta Tesis

En esta tesis, utilizando los telescopios más modernos de nuestra era, he estudiado las propiedades del polvo en protoestrellas y regiones de

formación estelar cercanas, que típicamente se asemejan a la estructura mostrada en la Figura 2. Mi investigación se ha enfocado principalmente en cómo evoluciona y crece el polvo, un paso fundamental hacia la formación planetaria, pero también he explorado cómo las moléculas, especialmente las moléculas orgánicas complejas, pueden ayudarnos a responder preguntas fundamentales sobre los orígenes de los sistemas planetarios.

La tesis está estructurada en cinco capítulos. El Capítulo 1 ofrece una introducción a la formación estelar, los discos protoplanetarios, el papel del polvo y el gas en estos discos, la presencia de moléculas orgánicas complejas y las subestructuras observadas en discos aislados. Los capítulos siguientes presentan análisis detallados sobre la evolución y crecimiento del polvo en discos, así como la química de las moléculas orgánicas complejas en diferentes regiones de formación estelar.

Capítulo 2: En este capítulo investigo la emisión de polvo a alta resolución del sistema binario NGC 1333 IRAS4A, una región protoestelar, que representa una de las fases más tempranas de formación estelar. Los resultados muestran que el polvo en IRAS4A1 ya ha alcanzado condiciones necesarias, como el tamaño y la densidad de los granos, para permitir la formación de planetesimales o subestructuras, regiones donde se cree que comienzan a formarse los planetas. Además, el modelado de transferencia radiativa sugiere que podrían existir subestructuras ya formadas, pero ocultas bajo capas densas de gas y polvo, lo que implica que la formación planetaria podría comenzar mucho antes de lo que se pensaba.

Capítulo 3: En este capítulo continúo el estudio del sistema NGC 1333 IRAS4A, esta vez centrado en las moléculas orgánicas complejas alrededor de la binaria IRAS4A2. Analizo su distribución espacial y su relación con los granos de polvo en el sistema. Los resultados revelan una distribución radial y azimutal más compleja de lo esperado, lo que indica una fuerte conexión entre la emisión molecular y cómo el polvo se acumula y se

asienta en regiones específicas. Este hallazgo sugiere una evolución del polvo muy rápida en IRAS4A2, especialmente en comparación con su compañera binaria IRAS4A1, donde la mayor parte de la emisión molecular parece estar oculta bajo el polvo.

Capítulo 4: Este capítulo se enfoca en HL Tau, un disco protoplanetario ligeramente más evolucionado. Usando imágenes de alta resolución a diferentes longitudes de onda, aplicamos modelos de transferencia radiativa para ajustar la emisión observada y derivar propiedades clave del polvo como el tamaño, la densidad y la temperatura. Particularmente, nuestras observaciones en la Banda 9 del telescopio ALMA revelan una estructura diferente, posiblemente asociada con granos más pequeños, una mayor extensión del disco y una nueva subestructura interna, visible solo en estas longitudes de onda más cortas.

Capítulo 5: En este capítulo analizo todos los discos protoplanetarios en una sola región de formación estelar, en la región de formación estelar, Lupus. Examinamos todos los radios y otros parámetros físicos de los discos y descubrimos que más del 67% de estos son muy compactos (radio < 30 au). Resaltamos que en estos discos también se detectaron subestructuras. Estos resultados sugieren que la mayoría de los discos ya tienen las condiciones para formar supertierras, uno de los tipos de exoplanetas más comunes descubiertos hoy en día, ofreciendo una conexión directa entre las propiedades iniciales de los discos y la población actual de exoplanetas.

A partir de los resultados presentados, concluimos que se debe prestar mayor atención a las estructuras radiales y verticales de los discos protoplanetarios. Estos discos no son simplemente estructuras planas y extensas, sino que presentan geometrías complejas y una gran variedad de radios. En particular, las variaciones en la estructura vertical a diferentes radios ofrecen pistas valiosas sobre las condiciones iniciales para la

formación de planetas y de las subestructuras.

Además, comprender si los discos son en su mayoría compactos o radialmente extensos nos puede ayudar a responder una pregunta fundamental: ¿es el Sistema Solar una excepción? Para formarlo se requieren discos de al menos 100 au, que permiten la formación de gigantes gaseosos, sin embargo, si la mayoría de los discos son compactos, el origen de la vida tal como la conocemos sería un proceso poco frecuente y, por ello, su hallazgo resultaría aún más desafiante.