



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Mining the kinematics of discs to hunt for planets in formation

Izquierdo Cartagena, A.F.

Citation

Izquierdo Cartagena, A. F. (2023, December 1). *Mining the kinematics of discs to hunt for planets in formation*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3665447>

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/1887/3665447>

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

Resumen de la tesis

Desde tiempos inmemoriales, nuestra especie ha estado estrechamente vinculada al cielo nocturno en una búsqueda continua de respuestas al significado de nuestra existencia que persiste hasta el día de hoy. De hecho, la investigación astronómica moderna, basada en siglos de progreso científico, produce a diario conocimiento valioso sobre la formación y evolución de galaxias, estrellas y planetas, acercándonos así a la comprensión de los mecanismos fisicoquímicos detrás de nuestro propio origen. Esta tesis se enfoca en un aspecto específico de nuestra historia: el estudio de discos protoplanetarios ricos en gas, donde nacen los planetas, con el objetivo de detectar las señales impresas por planetas gigantes que todavía están en proceso de formación dentro de estos entornos.

La aparición de planetas gigantes como Júpiter o Saturno desempeña un papel crítico en la evolución de discos protoplanetarios. Estos objetos tienen el potencial suficiente para influir en la distribución de materiales esenciales para la formación y composición de otros planetas, como el nuestro, y afectar las propiedades orbitales y físicas del futuro sistema planetario en su conjunto. Sin embargo, antes de adentrarnos en los detalles de la detección de planetas jóvenes, exploremos brevemente nuestra comprensión actual de la formación de estrellas y examinemos las propiedades dinámicas de los discos donde los planetas emprenden su viaje.

Formación de estrellas y discos

En nuestra Galaxia, las regiones de formación estelar son consecuencia del proceso de fragmentación gravitacional de nubes moleculares gigantes, el cuál es regulado por la energía inyectada por otras estrellas y la influencia de campos magnéticos presentes en el medio interestelar. Esta fragmentación se desarrolla de manera jerárquica, comenzando con la formación de *clumps* masivos que, bajo condiciones específicas de alta densidad y baja temperatura, se fragmentan en *cores* más pequeños, gravitacionalmente ligados, que representan la fase embrionaria de estrellas y sistemas planetarios.

La evolución de estos *cores* protostelares generalmente se desarrolla en etapas bien definidas, especialmente cuando su masa se encuentra en el rango más bajo, considerado por debajo de ocho veces la masa de nuestro Sol. Los astrónomos han establecido criterios empíricos para categorizar estos objetos, que dependen de

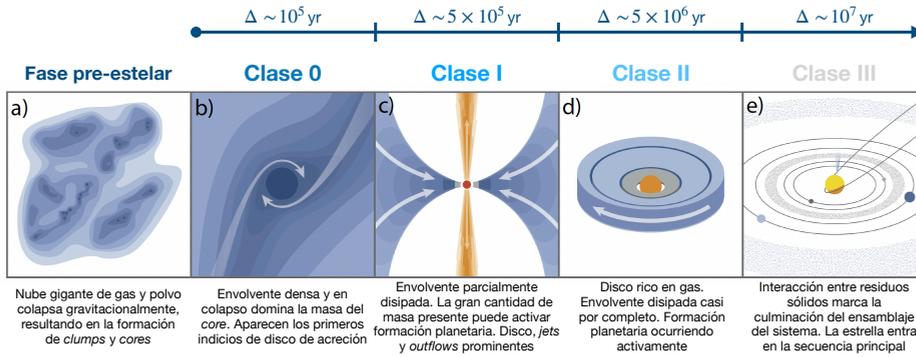


Figura 1: Vista esquemática del camino de formación de estrellas de baja masa (adaptado de Öberg & Bergin 2021).

observables relacionados con la distribución de polvo que rodea a la protostrella. Este factor es indicativo de la edad del sistema y se evalúa mediante el análisis de la distribución de energía espectral de la emisión de polvo en el infrarrojo medio y cercano. La Figura 1 muestra las fases evolutivas que uno de estos objetos experimenta típicamente.

A medida que la envoltura de material que rodea a la protostrella se achata y disminuye su masa gradualmente, ya sea por acreción en la estrella, o por expulsión del sistema a través de *outflows*, la estructura circumestelar dominante se convierte en disco protoplanetario, el cual persiste durante varios millones de años (objeto Clase II en la Figura 1). Durante este largo período, los planetas tienen tiempo suficiente para formarse a través de mecanismos de acreción y coagulación, un concepto tan antiguo como la hipótesis Nebular propuesta por Immanuel Kant y Pierre-Simon Laplace en el siglo XVIII para explicar el origen y la evolución de nuestro Sistema Solar, pero que solo puede probarse con las teorías e instrumentos de punta que tenemos a mano hoy en día.

La búsqueda de planetas en formación explorada en esta tesis se concentra en la detección de perturbaciones cinemáticas impulsadas por planetas embebidos en discos que pertenecen a esta etapa evolutiva. Sin embargo, antes de poder buscar estas señales en la práctica, es esencial comprender primero la estructura dinámica típica de discos en su estado no perturbado.

Estructura dinámica de discos protoplanetarios

La estructura y dinámica de discos protoplanetarios están moldeadas por la interacción entre el equilibrio de fuerzas gravitatorias y de presión y el transporte de momento angular necesario para culminar el proceso de acreción de materia hacia la estrella central. En buena aproximación, la velocidad de rotación de un disco protoplanetario es mayoritariamente kepleriana, ya que responde principalmente a la masa de la estrella, con una modulación diferencial a lo largo de la dirección

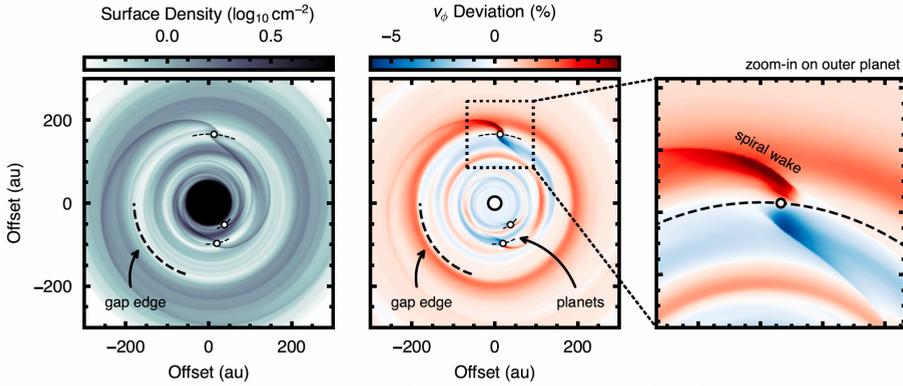


Figura 2: Instantánea de una simulación de interacción planeta-disco que ilustra la densidad superficial (izquierda) y las desviaciones porcentuales de la cinemática kepleriana (centro) desencadenadas por la presencia de planetas de masa similar a Júpiter. Las espirales y los huecos son resultados típicos de la interacción de marea entre los discos y los planetas. Créditos: Disk Dynamics Collaboration et al. (2020).

vertical debido al soporte de presión,

$$v_{\phi}(R, z) = \sqrt{\frac{GM_{\star}}{(R^2 + z^2)^{3/2}}} R, \quad (5.1)$$

Es importante notar que estas fuerzas de presión no se limitan a la dirección vertical del disco solamente, sino que también ejercen una influencia radial. Esta componente de presión radial generalmente opera de adentro hacia afuera, oponiéndose a la dirección en la que los gradientes de temperatura y densidad aumentan. En términos prácticos, esto implica que un gradiente de presión decreciente hace que el material rote a una velocidad sub-kepleriana alrededor de la estrella, y lo hace de manera más pronunciada en radios más grandes donde el grosor del disco es mayor. Dado que este efecto es simétrico acimutalmente, y generalmente su amplitud solo representa un pequeño porcentaje de la rotación del disco (normalmente < 5%), las perturbaciones cinemáticas externas, como las inducidas por planetas embebidos, suelen buscarse en forma de espirales o desviaciones altamente localizadas en la rotación kepleriana (ver Figura 2). Sin embargo, la detección de estas perturbaciones requiere comprender con precisión sus propiedades y su relación con la luz emitida por los discos, que es en última instancia lo que pueden capturar nuestros telescopios.

Observaciones de discos y la búsqueda de planetas jóvenes

La primera evidencia directa de un disco circumestelar surgió en la década de 1980 con el descubrimiento de una estructura achatada alrededor de la estrella joven HL Tau gracias a la técnica de interferometría de ondas milimétricas de alta resolución, que reveló una componente gaseosa detectada en emisión de ¹³CO, siguiendo

movimiento kepleriano y, por lo tanto, potencialmente asociado a material en rotación dominado por la gravedad de la estrella. Los avances tanto en observatorios terrestres como espaciales de las décadas siguientes expandieron significativamente nuestra comprensión de los discos protoplanetarios y los procesos que gobiernan su evolución. Específicamente, el Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), instrumento líder en su tipo en el momento de redacción de esta tesis, ha impulsado significativamente el campo de investigación en formación de planetas en la última década. Por ejemplo, las capacidades excepcionales de resolución y sensibilidad de ALMA han revelado un alto grado de subestructura en la distribución de polvo de una gran cantidad de discos protoplanetarios, proporcionando información sobre la posible presencia de planetas y sus propiedades físicas. Además, ALMA ha permitido el mapeo detallado de la estructura física y dinámica de discos mediante la observación simultánea de múltiples líneas moleculares emitidas por diversas especies químicas presentes en estos entornos. Esta tesis se basa en este tipo de datos para buscar potenciales perturbaciones cinemáticas impulsadas por planetas embebidos en discos.

Este enfoque está motivado por el hecho de que detectar planetas jóvenes de manera directa no es una tarea fácil debido a la alta extinción impuesta por el propio disco protoplanetario. PDS 70 es actualmente el único sistema donde se han observado directamente planetas en formación a través de emisión en el infrarrojo cercano y $H\alpha$ utilizando instrumentación de última generación en el Very Large Telescope (VLT), en parte ayudado por el hecho de que estos objetos se encuentran en regiones del disco despejadas de material opaco. Otros candidatos prometedores se han reportado en los discos de HD 169142 y AB Aur, pero sus detecciones aun esperan confirmación. El VLT también ha capturado con éxito imágenes de planetas que orbitan estrellas jóvenes como Beta Pictoris y HD 95086, pero estos sistemas ya han pasado a una etapa de disco de *debris*, donde la mayoría del material original para la formación de planetas se ha disipado o ha sido acretado, y por tanto en la práctica ofrecen poco conocimiento sobre el proceso de ensamblaje planetario. Por esta razón, enfoques indirectos como el explorado en esta tesis brindan una alternativa prometedora para superar estas limitaciones.

Propiedades de la interacción planeta-disco

Aunque la teoría analítica de perturbaciones inducidas por planetas en la dinámica de discos se remonta a trabajos pioneros en las décadas de los 1970s y 1980s, su fundamentación matemática ya se había establecido en el estudio de las interacciones de marea entre galaxias y sus estrellas, responsables de la formación de espirales en discos galácticos. El mismo concepto físico aplica a un planeta incrustado en un disco. Un planeta de este tipo ejerce torques gravitacionales en su vecindario más cercano, induciendo ondas espirales de densidad con una amplitud que depende de la masa del planeta y de las propiedades termodinámicas del disco. De hecho, estos estudios tempranos ya resaltarían la influencia significativa que la interacción de marea entre planetas y discos podría tener en propiedades planetarias fundamentales como la masa, así como su ubicación orbital y composición. Por otro lado, estos estudios también subrayarían que esta interacción gravitacional combinada

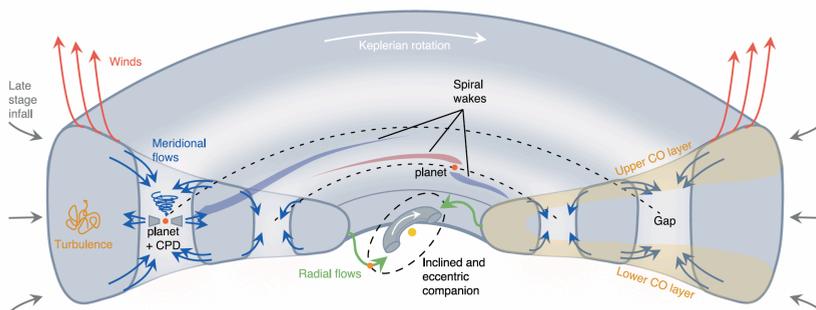


Figura 3: Resumen esquemático de las firmas principales esperadas de la interacción de planetas con discos de gas. También se muestran otros procesos relacionados con la evolución del disco como el flujo de material remanente de la envoltura hacia el disco y vientos. Créditos: Pinte et al. (2023).

con fuerzas disipativas inherentes al disco podrían regular la evolución del mismo y, en consecuencia, el material acretado por la protostrella.

En las últimas dos décadas, modelos numéricos han permitido un progreso significativo en el campo al proporcionar información sobre cómo se manifiestan las perturbaciones de densidad y velocidad inducidas por planetas bajo la influencia de varios mecanismos físicos, teniendo en cuenta estructuras de temperatura y densidad realistas basadas en evidencia observacional de discos. La Figura 3 resume algunas de las características esperadas de la interacción entre planetas y discos. Estas incluyen *gaps* axisimétricos moldeados por el planeta que pueden inducir flujos de velocidad observables en la dirección acimutal y vertical, así como señales no axisimétricas como ondas espirales a gran escala y desviaciones localizadas en la rotación kepleriana alrededor de la vecindad del planeta.

Sin embargo, antes de poder interpretar y atribuir estas señales a la presencia de planetas, es esencial comprender sus equivalentes observacionales. El telescopio, en este caso ALMA, no observa directamente el campo de velocidad del disco, sino que detecta la emisión de sus componentes de gas y polvo. La Figura 4 ilustra el patrón de intensidad de emisión de línea en $^{12}\text{CO } J = 2 - 1$ del disco alrededor de HD 163296, observado por ALMA, en diferentes velocidades proyectadas a lo largo de la línea de visión del telescopio. La apariencia de la emisión en cada canal de velocidad resulta de una combinación de factores, incluida la rotación casi kepleriana del disco, su inclinación y su estructura vertical.

Por esta razón, cuando un planeta induce una perturbación local en el movimiento rotacional del disco, la velocidad del gas cercano se desvía del comportamiento kepleriano esperado. En consecuencia, la emisión de esta parcela de gas debería aparecer en canales de velocidad adyacentes, lo cual resulta en la aparición de *kinks* o protuberancias observables en la intensidad proyectada de la línea molecular. Este fenómeno se identificó por primera vez en el disco de HD 163296, como se muestra en la Figura 5, marcando el inicio de un nuevo método para la detección de planetas jóvenes. Los autores de este estudio pionero demostraron

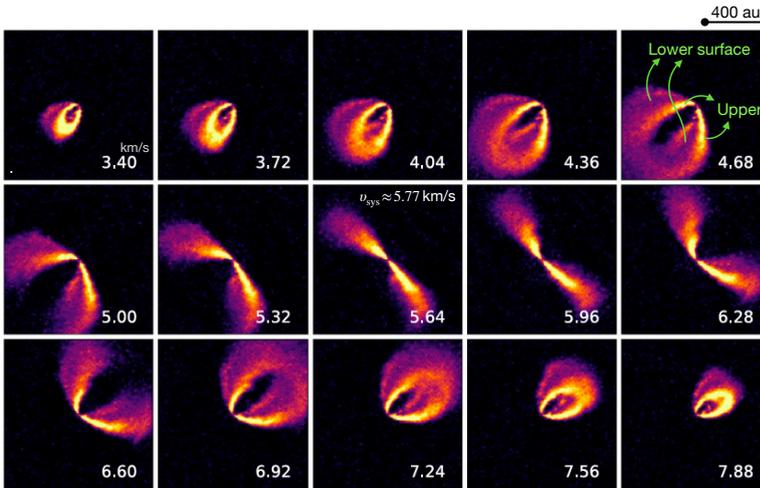


Figura 4: Ilustración del patrón de intensidad del disco de HD 163296 observado con ALMA en emisión de línea $^{12}\text{CO } J = 2-1$ (adaptado de Isella et al. 2018). La morfología de la emisión en cada canal de velocidad resulta del efecto combinado de la rotación quasi-Kepleriana del disco, su inclinación y estructura vertical.

que, bajo ciertas suposiciones sobre la estructura física y viscosidad del disco, este *kink* de intensidad podría replicarse invocando un planeta gigante con una masa dos veces más alta que la de Júpiter, a una distancia orbital de 260 unidades astronómicas (una unidad astronómica es la separación promedio entre la Tierra y el Sol). Desde entonces, estudios similares que relacionan *kinks* de intensidad con la presencia de planetas se han vuelto cada vez más comunes en observaciones de alta resolución con ALMA. Sin embargo, esta proliferación también ha planteado preguntas sobre cuáles de estas protuberancias son genuinamente debidas a perturbaciones locales de velocidad y además relacionadas con planetas embebidos. Uno de los objetivos de esta tesis es proporcionar una metodología cuantitativa para identificar o descartar estas características observacionales como perturbaciones localizadas usando métodos estadísticos robustos.

Esta tesis

A medida que el campo de la detección de planetas jóvenes se enfoca en la adquisición de datos profundos de alta resolución de discos protoplanetarios se hacen más recurrentes los *kinks* de velocidad observados en mapas de intensidad. Esto plantea la pregunta: ¿cuán confiables son estas detecciones y cuáles se pueden atribuir verdaderamente a interacciones entre planetas y discos? Esta tesis se centra en introducir y aplicar una nueva metodología estadística para identificar firmas cinemáticas impulsadas por planetas embebidos en discos, y está estructurada de la siguiente manera:

El Capítulo II introduce el marco de análisis, llamado DISCMINER, diseñado

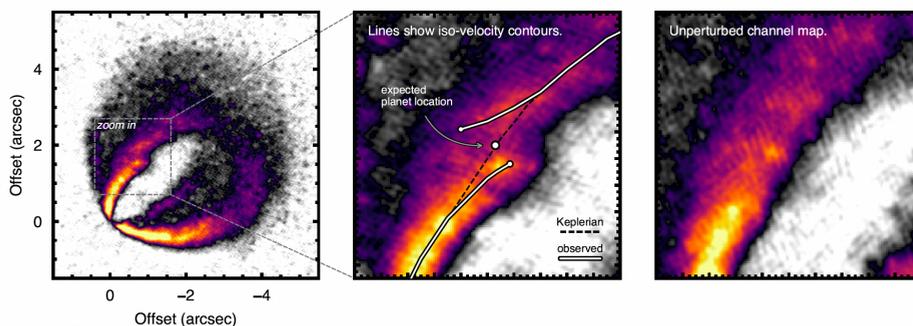


Figura 5: Primer *kink* de intensidad reportado en un disco protoplanetario y asociado a un planeta embebido (Pinte et al. 2018b). El *kink* fue observado con ALMA, en emisión de ^{12}CO en el disco de HD 163296, y es el resultado de desviaciones de rotación Kepleriana con altas amplitudes, atribuidas a la presencia de un planeta con una masa 2 veces mayor a la de Júpiter. También se muestra un canal no perturbado observado al lado opuesto del disco (y rotado para facilitar la comparación) con el objetivo de ilustrar el patrón de intensidad generado por una rotación suave. Créditos: Disk Dynamics Collaboration et al. (2020).

con el objetivo de modelar la intensidad de líneas moleculares de discos protoplanetarios e extraer perturbaciones en el campo de velocidades. En este capítulo, se presenta la utilidad de este marco de análisis utilizando simulaciones numéricas de la interacción entre planetas y discos. Por otro lado, se demuestra que el método extrae con precisión el radio orbital y la ubicación azimutal de planetas incrustados similares a Saturno y Júpiter al identificar perturbaciones localizadas en la rotación kepleriana del disco. Este capítulo destaca que las perturbaciones máximas de velocidad son pronunciadas y coherentes cerca de los planetas, lo cual puede usarse como un criterio cuantitativo para la detección de los mismos.

En el Capítulo III se muestra la aplicación de DISCMINER a observaciones de ALMA del disco de HD 163296, donde el primer *kink* de intensidad fue encontrado y relacionado con la presencia de un planeta gigante en trabajos anteriores. Este capítulo revela que esta protuberancia en intensidad es el resultado tanto de una perturbación local en la velocidad como de una estructura espiral extendida, brindando un mayor respaldo a la existencia del planeta masivo sugerido a una órbita lejana al interior de este disco. Además, este capítulo presenta el descubrimiento de un nuevo planeta candidato de masa similar a Júpiter, más cerca del centro del sistema, ubicado en medio de un *gap* en la densidad superficial del disco y asociado con una perturbación localizada en velocidad.

El Capítulo IV amplía la búsqueda de perturbaciones inducidas por planetas a varios discos protoplanetarios y trazadores moleculares observados con ALMA, revelando un gran nivel de subestructura tridimensional simultáneamente en campos de velocidad, ancho de línea e intensidad. En este capítulo, se identifican nuevamente perturbaciones localizadas en el disco alrededor de HD 163296, potencialmente inducidas por planetas gigantes embebidos, trazadas no solo en forma

de desviaciones de movimiento kepleriano, sino también como incrementos en la dispersión de velocidad en un amplio rango de altitudes. Los discos de MWC 480 y AS 209 también muestran indicios de interacción entre planetas y discos, pero en lugar de ser localizadas, estos se caracterizan por exhibir subestructuras a mayor escala espacial tanto en velocidad como en ancho de línea.

El Capítulo V presenta una metodología mejorada para detectar subestructuras de gas y posibles firmas inducidas por planetas en discos observados a una alta resolución de velocidad en el contexto del programa exoALMA. Basándose en los avances de los capítulos anteriores, esta sección introduce una mejora en la precisión de extracción de velocidades y en la metodología para identificar subestructuras tanto localizadas como a gran escala, aplicada a los discos de HD 135344B, LkCa 15 y MWC 758. Este capítulo revela fuertes indicios de interacciones de marea entre estos objetos y planetas gigantes, y propone ubicaciones para los planetas candidatos de acuerdo a las perturbaciones de velocidad y ancho de línea identificadas a través de un estudio tomográfico de múltiples líneas moleculares.

Perspectivas futuras

Si bien contamos con una base sólida en lo que respecta a las señales esperadas de las interacciones entre planetas y discos, lo más seguro es que los planetas en proceso de formación coexistan con diversos procesos físicos adicionales ocurriendo en el disco, como inestabilidades gravitacionales y magneto-hidrodinámicas, que podrían potencialmente inducir perturbaciones de magnitudes y morfologías similares a las que esperaríamos de los planetas. El campo demanda entonces estudios sistemáticos que demuestren la relevancia y/o dominancia dinámica de estos procesos cuando están activos y su impacto en la detección de las señales inducidas por planetas. Naturalmente, esta tarea conlleva una gran demanda computacional, ya que implica considerar factores como variaciones en la estructura física del disco y en las propiedades de los planetas, así como el impacto de distintos parámetros observacionales. Sin embargo, métodos de vanguardia basados en inteligencia artificial están ganando terreno en el campo y pueden ayudar significativamente en la clasificación cuantitativa de los observables planetarios más determinantes.

En el frente observacional, actualmente están surgiendo avances significativos en la obtención de imágenes directas de planetas gracias a la gran sensibilidad de instrumentos como JWST y MagAO-X. En unos años, el *Extremely Large Telescope* (ELT), con su notable resolución espacial, jugará un papel fundamental en nuestra comprensión de la formación de planetas en la parte central del disco, donde se ensamblan y evolucionan la mayoría de planetas como el nuestro. Específicamente, el *Mid-infrared ELT Imager and Spectrograph* (METIS) será un gran complemento de ALMA pues ofrecerá imágenes de alta resolución de estas regiones más internas del disco, pero también ayudará a identificar emisión térmica y firmas de acreción alrededor de planetas como Júpiter en una amplia gama de separaciones orbitales. En el campo de la cinemática, METIS nos permitirá explorar la dinámica de las regiones internas del disco a través del estudio de líneas ro-vibracionales en CO, que pueden abordarse de manera similar a las metodologías presentadas en esta tesis con el propósito de detectar planetas y caracterizar su entorno de formación.