

Imagen directa de exoplanetas fríos y templados en luz reflejada. Posibilidades de caracterización atmosférica y selección de potenciales objetivos

Autor: Óscar Carrión-González

Tesis doctoral dirigida por: Antonio García Muñoz, Heike Rauer y Dieter Breitschwerdt

Centro: Technische Universität Berlin

Fecha de lectura: 25 de marzo 2022

Los más de 5000 exoplanetas descubiertos hasta la fecha han revelado una diversidad de mundos insospechada hace solo unas décadas. A esto se suman miles de candidatos detectados y decenas de miles de nuevos descubrimientos previstos con los telescopios venideros tanto en tierra como en el espacio. Para entender en más detalle esta diversidad de exoplanetas es necesario pasar de la mera detección a la caracterización atmosférica. Esto proporcionará información única sobre su posible formación y evolución, así como sobre su actual composición y estructura atmosférica, incluyendo sus posibles condiciones de habitabilidad.

La población de exoplanetas conocidos está sin embargo sesgada hacia planetas gigantes, calientes y de corto período orbital, ya que son más fáciles de detectar con las principales técnicas de observación actuales: tránsitos y velocidad radial. La caracterización atmosférica de exoplanetas, hasta ahora realizada mayoritariamente mediante espectroscopía de tránsitos, presenta este mismo sesgo. Los exoplanetas fríos y templados de largo período han quedado generalmente fuera del alcance de estos análisis. El telescopio espacial *James Webb* comenzará a reducir este sesgo, haciendo espectroscopía de tránsito de algunos planetas templados y de baja masa en torno a estrellas enanas rojas. Se podrá así determinar si tales planetas pueden retener una atmósfera en torno a estrellas tan activas y, en tal caso, analizar sus capas atmosféricas superiores. Pese a esto, el *James Webb* no podrá acceder a planetas fríos y de largo período, así como a los planetas templados en torno a estrellas de tipo solar, entre los cuales se encuentran los potenciales análogos terrestres.

Estudiar esa población de planetas, así como el conjunto de planetas que no transitan, requerirá de observaciones en imagen directa. En esta tesis doctoral hemos analizado el potencial científico de la técnica de imagen directa en luz reflejada. Estas observaciones estarán disponibles desde esta misma década con el lanzamiento del telescopio espacial *Nancy Grace Roman*, dotado de un coronógrafo en el rango espectral visible. El objetivo de esta tesis es estudiar los fundamentos físicos de esta técnica y derivar conclusiones prácticas para la planificación e interpretación de las futuras observaciones.

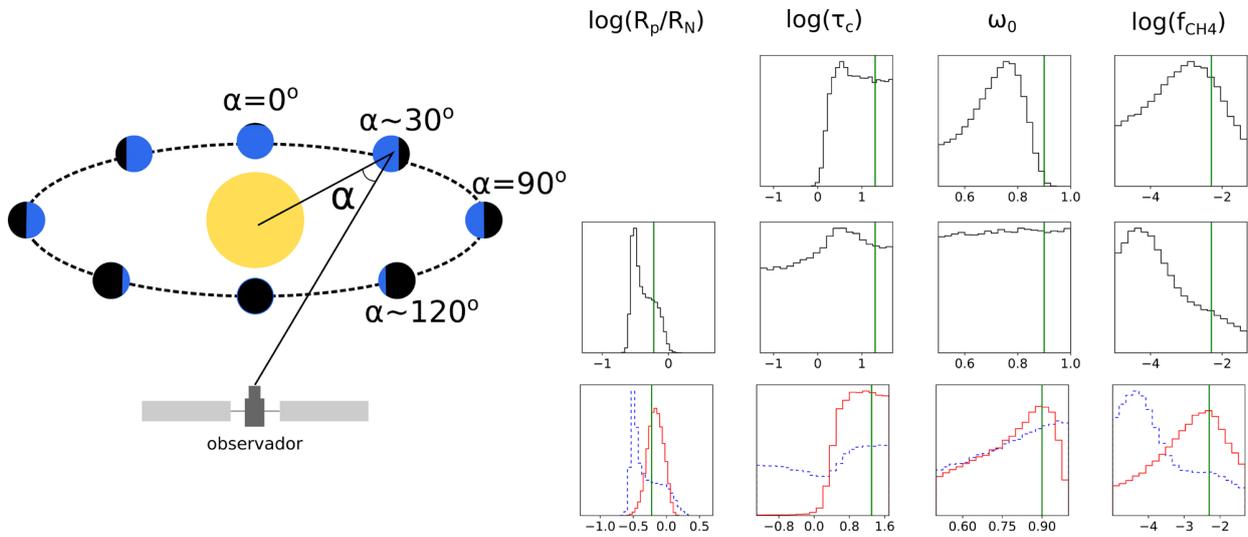
Como parte de esta tesis se ha desarrollado un código de *retrieval* atmosférico para observaciones de exoplanetas en imagen directa de luz reflejada (Carrión-González et al. 2020, A&A, 640, A136). El modelo diseñado incluye parámetros físicos especialmente relevantes para esta técnica tales como el radio planetario, lo cual nos ha permitido encontrar correlaciones entre parámetros que no habían sido reportadas previamente

en la literatura. En particular, uno de los principales resultados de esta tesis es que si el radio del planeta es desconocido se desencadenan correlaciones con otros parámetros atmosféricos como las propiedades ópticas de las nubes o la abundancia de gases absorbentes (CH_4). En síntesis, la imagen obtenida del planeta (un píxel) puede aparecer más brillante ya sea porque este tenga un mayor tamaño o porque tenga una atmósfera más reflectante (con nubes brillantes o menos CH_4). Encontramos por tanto que, aunque el radio no es un parámetro atmosférico en sí mismo, no conocer su valor afecta de manera clave a la caracterización atmosférica del planeta. Dado que los exoplanetas de largo período observables en imagen directa generalmente no transitarán, esta conclusión es relevante de cara a predecir el potencial científico de telescopios como el *Roman*.

También investigamos durante la tesis las posibles estrategias observacionales para superar estas correlaciones entre parámetros causadas por un radio planetario desconocido (Carrión-González et al. 2021, A&A, 655, A92). El código de *retrieval* atmosférico fue ampliado para habilitar la combinación de múltiples observaciones en diferentes posiciones orbitales. Comprobamos así que combinar medidas de un planeta a múltiples ángulos de fase (α , ver figura) es una estrategia efectiva para romper dichas correlaciones. En concreto, observar a ángulos de fase pequeños y grandes ($\sim 40^\circ$ y $\sim 120^\circ$) permite muestrear las asimetrías en la función de *scattering* de los aerosoles atmosféricos. Así, al caracterizar con precisión las propiedades ópticas de las nubes se reduce también la incertidumbre sobre los otros parámetros físicos correlacionados: la abundancia de especies gaseosas y el radio del planeta. Las implicaciones prácticas son que, a la hora de priorizar exoplanetas para observar en imagen directa de luz reflejada, aquellos con amplios rangos de ángulos de fase observables ofrecen mejores perspectivas de caracterización atmosférica. Para determinar qué exoplanetas son potenciales objetivos para telescopios de imagen directa y cuáles son prioritarios para análisis atmosféricos, esta tesis presenta un nuevo método estadístico que calcula la detectabilidad de cualquier planeta descubierto o aún candidato (Carrión-González et al. 2021, A&A, 651, A7). Procesando la información (e.g. del *NASA Exoplanet Archive*) y realizando miles de simulaciones orbitales para cada planeta conocido, podemos calcular su probabilidad de ser observable, así como el rango de ángulos de fase observables y otros parámetros de interés para la planificación de observaciones. En la tesis se aplicó este método al telescopio espacial *Roman* y actualmente se está aplicando a la siguiente generación de telescopios propuestos tanto en Europa como en EE. UU. Encontramos que hasta 25 planetas podrían ser accesibles con *Roman*, siendo la mayoría planetas gigantes fríos pero incluyendo también supertierras como tau Ceti e y f, en los límites de la zona de habitabilidad. La próxima generación de telescopios (LUVOIR, HabEx, LIFE) podrá observar varios cientos más de los planetas conocidos. A esta lista se añadirán los futuros descubrimientos en velocidad radial (con CARMENES o ESPRESSO), en astrometría (con Gaia) y en tránsitos de planetas de período largo (principalmente con PLATO).

Tesis disponible en:

<http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-15465>



Retrievals atmosféricos para un planeta con nubes en comparación con el valor verdadero asumido para cada parámetro (líneas verticales verdes). Se muestran: el radio del planeta en relación al de Neptuno (R_p/R_N), el espesor óptico de la nube (τ_c), el single-scattering albedo de los aerosoles de la nube (ω_0) y la abundancia de metano en la atmósfera (f_{CH4}). Fila superior: una única observación a fase 0° , asumiendo conocido el radio del planeta. En este caso se detecta la presencia de nubes al descartarse nubes con $\log(\tau_c) < 0$. Se puede estimar también la abundancia de CH_4 en la atmósfera. Fila intermedia: una única observación a fase 0° . R_p se asume desconocido y se incluye como un parámetro más en los retrievals. Se pierde toda la información sobre la presencia o ausencia de nubes y sobre la abundancia de CH_4 por las correlaciones de R_p con los parámetros atmosféricos. Fila inferior: combinación de varias observaciones asumiendo R_p desconocido. En línea azul discontinua se muestra la combinación de medidas a fase pequeña ($\sim 30^\circ$) y moderada (90°), sin observar demasiada mejora respecto a una única observación. En línea roja continua se combinan medidas a fase pequeña ($\sim 30^\circ$) y grande ($\sim 120^\circ$). Se aprecia en este caso una mejora significativa en todos los parámetros, detectándose la nube y determinando sus propiedades ópticas, así como estimando la abundancia de CH_4 y el radio planetario.