

## Agrupamiento de galaxias con el *Dark Energy Survey*: medida y mitigación de sistemáticos

Autor: Martín Rodríguez Monroy

Tesis doctoral dirigida por: Eusebio Sánchez Álvaro e Ignacio Sevilla Noarbe

Centro: Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)

Fecha de lectura: 10 de noviembre de 2021

Esta tesis se ha desarrollado dentro del *Dark Energy Survey* (DES), una colaboración internacional que busca entender la naturaleza de la energía oscura. DES ha tomado datos durante seis años, observando 691M de objetos desde el Telescopio Víctor Blanco de 4 m en Cerro Tololo, Chile. Ha observado 5000 deg<sup>2</sup>, en cinco bandas fotométricas anchas en el rango óptico grizY. Las imágenes se tomaron con el instrumento DECam. Los datos correspondientes a los tres primeros años de observaciones (Y3) contienen información sobre 399M de objetos. Con estos datos se generan las dos muestras de galaxias lente empleadas durante el análisis de DES-Y3: MagLim, una muestra limitada en magnitud y optimizada para maximizar el poder de determinación de los parámetros cosmológicos que contiene ~11M de galaxias, y redMaGiC, una selección de ~3M de galaxias rojas luminosas con desplazamientos al rojo fotométricos de alta calidad. Este trabajo se ha llevado a cabo como parte del proyecto de medición del agrupamiento de galaxias y de mitigación de sistemáticos observacionales en los datos DES-Y3 y representa una aportación esencial para las medidas cosmológicas obtenidas por DES. Como sistemáticos observacionales, consideramos las condiciones de observación, como el seeing o el brillo del cielo; las propiedades del cartografiado, como el tiempo de exposición o la profundidad; y las fuentes astrofísicas, como la densidad estelar y la extinción por el polvo galáctico. Para caracterizar estos contaminantes, utilizamos mapas de propiedades del cartografiado (*SP maps* por sus siglas en inglés) en HEALPix, que dan cuenta de las variaciones espaciales de diferentes efectos relativos a la toma de imágenes. Partiendo de 107 de estos mapas, este número se reduce mediante dos métodos diferentes desarrollados en el marco de esta tesis: uno basado en la identificación de familias de mapas utilizando matrices de correlación de Pearson y el otro aplicando un análisis de componentes principales (PCA) a los mapas. De este modo, definimos dos bases de mapas de SP, la base estándar (STD) y la base de componentes principales (PC).

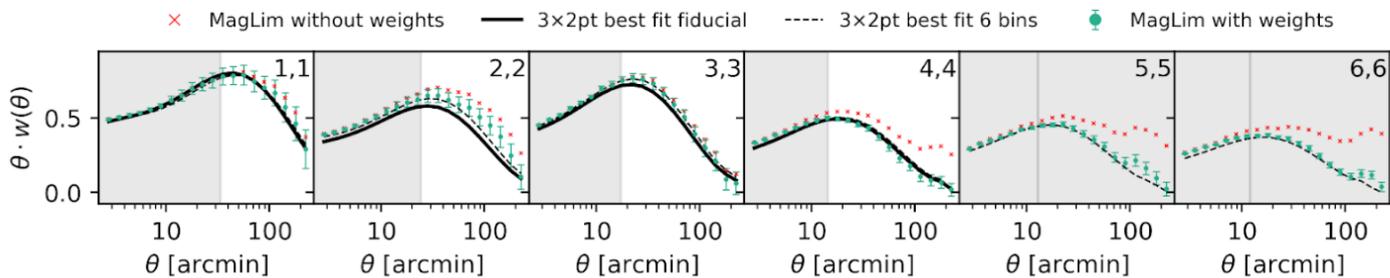
Para mitigar el impacto de los sistemáticos observacionales, aplicamos el método *Iterative Systematics Decontamination* (ISD). ISD es un método iterativo que evalúa la significación estadística de la contaminación causada por cada mapa SP mediante el ajuste de la relación entre sus valores en el cielo y la densidad de número de galaxias observada. La significación,  $S_{1D}$ , se obtiene calculando esta misma relación sobre catálogos simulados, libres de contaminación. Una vez identificado el mapa SP con la mayor significación, ISD corrige su impacto calculando un mapa de pesos y aplicándolo multiplicativamente a los datos, mitigando su contaminación. Este proceso se

Derecha: Resultados de la función de correlación angular medida en la muestra MagLim en DES-Y3. Las cruces rojas corresponden a los datos sin corrección por sistemáticos observacionales y los puntos verdes a los datos corregidos por ISD-PC < 50. La línea negra representa la función de correlación angular,  $w(\theta)$ , teórica dada por el mejor ajuste a partir del análisis de 3x2pt de DES-Y3. Las barras de error corresponden a la diagonal de la matriz de covarianza analítica y las regiones sombreadas representan las escalas angulares excluidas en los ajustes cosmológicos.

ejecuta iterativamente hasta que la significación de todos los mapas está por debajo de un umbral,  $T_{1D}$ , fijado de antemano. También presentamos el método *Elastic Net* (ENet), un método de corrección alternativo que realiza un ajuste multilíneal a todos los mapas SP mediante una regularización *elastic net*. Así, controla el nivel de contribución de cada mapa SP a los pesos correctores. El método de referencia en DES-Y3 es ISD, mientras que ENet se usa para validación.

Una vez obtenidos los pesos correctores con ISD, es necesario validarlos para asegurar que no causan ningún tipo de sesgo en  $w(\theta)$  y por tanto en la inferencia de parámetros cosmológicos. En esta tesis presentamos las pruebas de validación que se han implementado para esta tarea. Estas pruebas evalúan no sólo los mapas de pesos en sí mismos, sino que también permiten encontrar debilidades en nuestros métodos de descontaminación. Los principales sesgos que buscamos son el sesgo por falsa corrección y el sesgo por sistemáticos residuales. El primero se debe a posibles sobrecorrecciones causadas por la correlación fortuita entre los mapas SP y el campo de densidad que es tratada como contaminación real, eliminando así señal cosmológica real. El segundo es una posible infra-corrección de los datos debido a contaminación que no se ha eliminado correctamente. Determinamos la magnitud de estos sesgos tanto en la función de correlación como en la inferencia del parámetro cosmológico  $\Omega_M$  y de la relación galaxia-materia,  $b^j$ , ambos sensibles a la amplitud de  $w(\theta)$ . Para estas pruebas, utilizamos simulaciones sin contaminación y, además, un conjunto de simulaciones contaminadas que reproducen los efectos sistemáticos observados en los datos. Llegamos a la conclusión de que el nivel de sesgo por falsa corrección está dentro de la incertidumbre estadística, mientras que el sesgo por sistemáticos residuales no puede ser despreciado. Para tener en cuenta este sesgo, marginalizamos sobre él añadiendo su contribución como error sistemático a la matriz de covarianza final utilizada para los ajustes cosmológicos. También tenemos en cuenta la diferencia entre los resultados obtenidos con ISD y ENet en los datos como un término sistemático adicional a la covarianza. Dado el aumento de la potencia estadística de los datos de DES-Y3, la caracterización y validación de la corrección de sistemáticos ha sido un reto importante.

Por último, presentamos los resultados de agrupamiento de galaxias obtenidos a partir de las dos muestras de galaxias lente una vez aplicadas y validadas las correcciones de sistemáticos. Estos resultados representan la medición de  $w(\theta)$  obtenida en el mayor conjunto de galaxias hasta la fecha. Los problemas asociados con redMaGiC motivaron reevaluar numerosos aspectos del análisis de DES-Y3, incluida la corrección de sistemáticos observacionales. Estas pruebas adicionales son uno de los principales resultados presentados en esta tesis y han servido para garantizar la robustez de nuestras correcciones y elecciones en el análisis, así como para mejorar aún más nuestras metodologías.



## Estudio del viento solar a 1 UA y sus valores atípicos

Autor: Carlos Larrodera Baca

Tesis doctoral dirigida por:

Consuelo Cid Tortuero

Centro: Universidad de Alcalá

Fecha de lectura: 5 de julio de 2022

El presente trabajo muestra los resultados del estudio de la distribución de viento solar a una unidad astronómica a través del estudio de diferentes magnitudes que caracterizan el viento solar.

En nuestro estudio proponemos la función de distribución biGaussiana para caracterizar la distribución del viento solar. Esta función se define como la suma de dos funciones Gaussianas donde cada una de ellas representa las contribuciones presentes en el viento solar, viento lento y viento rápido.

Esta separación es conocida y aceptada al referirse a la función de distribución de la velocidad del viento solar, pero no es tan conocida ni tan clara al referirse a otras magnitudes como la densidad, temperatura, campo magnético o composición. En nuestro análisis hemos confirmado que esta distribución bimodal también puede ser apreciada en estas últimas magnitudes.

El estudio del viento solar a través del estado de carga promedio del hierro ha puesto de manifiesto su utilidad como indicador para localizar eyecciones de masa coronal en el medio interplanetario (ICME). Gracias a este estudio hemos podido

encontrar ICMEs que no estaban listadas en los catálogos existentes, y también ha servido para redefinir sus límites en algunas ICMEs que sí estaban catalogadas.

Usando la teoría estadística de valores extremos, hemos analizado la cola de la distribución de las magnitudes representativas del viento solar donde se sitúan los eventos más extremos, para los cuales hemos podido obtener su periodo de retorno, es decir, el tiempo estimado en el que se espera que tenga lugar un evento de dichas características. Estos resultados teóricos han podido ser contrastados con medidas experimentales de los eventos más extremos registrados, confirmando que los resultados teóricos cuadran con las medidas realizadas por diferentes autores.

Nuestra investigación ha permitido desarrollar una herramienta de monitorización del viento solar en tiempo real que puede consultarse en la página web del Servicio Nacional de Meteorología Espacial (<http://www.senmes.es/section/2>), donde se muestra la evolución del viento solar en las últimas 24 horas, así como diferentes niveles de alerta basados en el análisis del conjunto de datos históricos de los últimos 20 años.

## Diseño de sistemas optomecánicos para el nuevo telescopio robótico de 4-m

Autor: Asier Oria Carreras (asier.oria@pm.me)

Tesis doctoral dirigida por:

Carlos M. Gutiérrez de la Cruz

Centro: Universidad de La Laguna

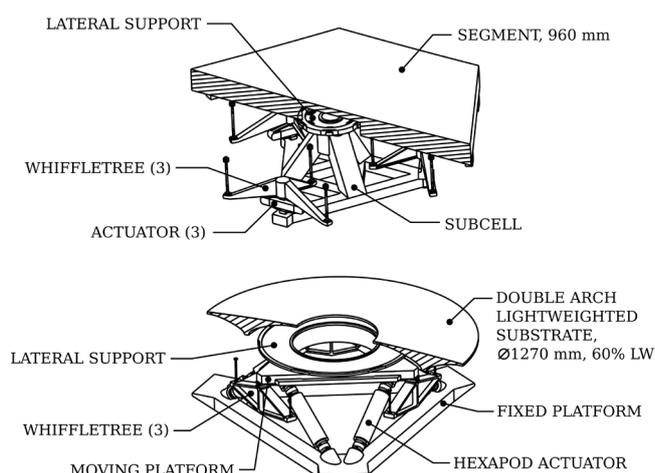
Fecha de lectura: 8 de julio de 2022

El interés en la astronomía de dominio temporal va en aumento año a año. La capacidad para detectar fenómenos transitorios cada vez más tenues motiva la necesidad de una nueva generación de telescopios robóticos más grandes y rápidos que puedan realizar una identificación, clasificación y caracterización espectroscópica eficiente de los mismos. El telescopio NRT (*New Robotic Telescope*) será el primero de esta nueva generación de telescopios robóticos, y su diseño se sustentará en la experiencia adquirida con el *Telescopio Liverpool*. Su primera luz está prevista para 2026 y con una apertura de 4m, un tiempo de respuesta inferior a 30 segundos y una ubicación privilegiada en un observatorio con las excelentes condiciones para la observación astronómica como el ORM, augura a convertirse en una instalación líder de la astronomía de dominio temporal. Como precursor de esta nueva clase de telescopios, algunos de sus sistemas, y en particular los más relacionados con la respuesta rápida y el funcionamiento autónomo, requieren soluciones innovadoras que definan nuevos estándares para futuros diseños. Esta tesis aborda los estudios y análisis optomecánicos que se han llevado a cabo durante la fase conceptual del proyecto NRT. Se discuten diferentes alternativas que contribuyan a alcanzar el requerimiento de apuntado rápido, se evalúan las implicaciones en la selección de la topología del espejo primario, y se plantea una primera propuesta de diseño para los sistemas optomecánicos del espejo primario y secundario.

Se ha desarrollado un modelo numérico para analizar el efecto de la mecánica del telescopio y de diferentes perfiles de movimiento en el requisito de tiempo de apuntado. Este modelo también considera el tiempo necesario para amortiguar la estructura y así cumplir con las exigencias del sistema óptico. Con este análisis se demuestra que una reducción de peso

en el sistema permite mejorar su rendimiento, lo que encaja a la perfección con la nueva tendencia de diseño de telescopios medianos basados en un espejo primario segmentado, que consiguen ser más rápidos y ligeros. El estudio identifica asimismo varias alternativas comerciales de motores que pueden ser adecuadas para este telescopio. Con el propósito de aligerar el sistema, se realiza un estudio de diferentes configuraciones segmentadas para el espejo primario. En concreto, se plantean una serie de alternativas basadas en espejos circulares y hexagonales, y se definen una serie de figuras de mérito que permiten compararlas en términos de peso, calidad de imagen y complejidad de su sistema de soporte. Este análisis concluye proponiendo para el NRT una configuración basada en 18 espejos hexagonales e independientes entre sí de 960 mm. Por último, se plantea una propuesta de diseño para el espejo primario y otra para el secundario del telescopio. Se comprueba que un segmento soportado axialmente mediante un árbol de palancas mecánico en nueve puntos, un diafragma central para el soporte lateral y tres actuadores piezoeléctricos, constituyen una solución sencilla y robusta que es capaz de cumplir con los requisitos del sistema. Para el espejo secundario de Ø1270 mm se propone un sustrato aligerado al 60% en forma de doble arco y soportado axialmente en seis puntos de apoyo como una solución de compromiso entre un coste moderado y una mejora de prestaciones. En caso de reducir el tamaño de este espejo (a Ø940 mm), también se identifica un sustrato de pared trasera abierta sobre tres puntos como una alternativa prometedora mucho más simple. El comportamiento de estos diseños se analiza primeramente mediante aproximaciones analíticas y posteriormente se optimiza mediante modelos paramétricos de elementos finitos. Asimismo, se aborda en detalle el proceso de corrección de parte del error del espejo secundario haciendo uso de los grados de libertad de los segmentos del espejo primario. Esta consideración permite relajar los requerimientos del sistema optomecánico del secundario y conseguir un diseño más ligero.

Probablemente, en un futuro cercano nuevos telescopios robóticos de similar tamaño y características acompañarán al NRT para permitir un seguimiento 24h de todo el cielo nocturno. Del mismo modo en el que actualmente cooperan las redes de pequeños telescopios robóticos, estas darán paso próximamente a redes de telescopios robóticos mucho mayores como el NRT. Este hito será el comienzo de una época dorada para la astronomía de dominio temporal, y seguramente permitirá revolucionar la manera en la que entendemos el Universo. La metodología y los análisis presentados en esta tesis pretenden convertirse en una guía útil para estos nuevos desarrollos.



Diseño conceptual de los segmentos del espejo primario (superior) y espejo secundario (inferior) del telescopio NRT.

## Flujos de gas ionizados en la Nebulosa de Orión: propiedades y dependencias ambientales

Autor: José Eduardo Méndez Delgado (jemd@uni-heidelberg.de)

Tesis doctoral dirigida por: César Esteban y Jorge García-Rojas

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) / Universidad de La Laguna (ULL)

Fecha de lectura: 23 de septiembre de 2022

Esta tesis doctoral está dedicada al análisis de los objetos Herbig-Haro (HHs) de la región central de la Nebulosa de Orión y su impacto en el gas ionizado circundante.

Los HHs son chorros de gas colimados, eyectados desde protoestrellas. Aunque sus propiedades físicas y mecanismo de excitación han sido extensamente estudiados en nubes de gas neutro, la situación no es la misma con respecto a los HHs inmersos en regiones HII. El estudio de estos últimos objetos requiere el uso de espectroscopía de alta resolución espectral para poder separar su emisión de la radiación nebular de fondo, usando el desplazamiento Doppler. En esta tesis he empleado principalmente espectros de alta resolución espectral obtenidos con el espectrógrafo *Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph* (UVES) del *Very Large Telescope* (VLT) e imágenes de alta resolución espacial del *Telescopio Espacial Hubble* (HST). Las observaciones se centraron en HH529II, HH529III, HH204 y HH514, objetos localizados a diferentes distancias de la estrella ionizante principal de la Nebulosa de Orión,  $\theta 1$  Ori C, y con diferentes velocidades aparentes de propagación.

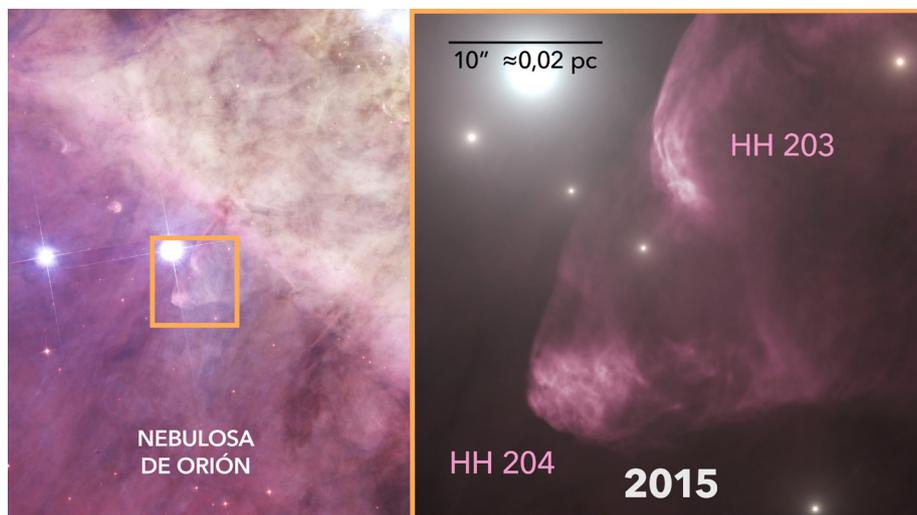
El análisis realizado confirma que el mecanismo de excitación principal de estos HHs es la fotoionización, a diferencia de sus contrapartidas en las nubes de gas neutro, excitadas por ca-

lentamiento por choques. Esta característica permitió analizar los espectros ópticos de la muestra como regiones HII a pequeña escala, pudiendo determinar sus propiedades físicas, cinemáticas y abundancias químicas con una precisión y un nivel de detalle sin precedentes. Con las imágenes del HST y la información cinemática se determinaron las trayectorias tridimensionales de estos objetos, localizando su posible origen en distintas zonas de formación estelar de la Nebulosa de Orión. El impacto local de los HHs en el gas fotoionizado es importante ya que incrementan fuertemente la densidad local y disminuyen el grado de ionización. Estos fenómenos repercuten en las abundancias químicas obtenidas en regiones limitadas de la Nebulosa de Orión cuando se emplean espectros de resolución espectral intermedia o baja, donde se mezclan las distintas componentes cinemáticas.

En el estudio de HH514 se encontraron abundancias de He, N, O, Ne y Ar similares a las de la Nebulosa de Orión, mientras que el Fe/H, Ni/H y S/H presentan sobreabundancias anómalas, siendo la del último elemento de aproximadamente el doble del valor solar y de la propia nebulosa. Aunque parte del Fe y Ni gaseoso pudo haberse liberado durante la destrucción de granos de polvo en el choque de HH514 con el gas circundante, los mapas de emisión térmica infrarroja muestran que el polvo no ha sido totalmente destruido. La sobreabundancia de estos elementos parece originarse más bien en el arrastre de material desde las zonas internas del disco protoplanetario 170-337, donde emerge HH514. La posible existencia de formación planetaria en 170-337 generaría gradientes de presión en el disco, filtrando los granos de polvo más grandes, como los sulfuros (FeS, NiS), que podrían ser eyectados posteriormente con el resto del material de HH514. Esto podría ser evidencia indirecta de formación planetaria en zonas de formación estelar masiva, dentro de entornos fotoionizados inmersos en campos de intensa radiación ultravioleta.

Los resultados de la tesis se publicaron en una serie de tres artículos en las revistas científicas arbitradas *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* y *The Astrophysical Journal*: Méndez-Delgado et al. 2021a, Méndez-Delgado et al. 2021b y Méndez-Delgado et al. 2022b. También han sido la base de algunas notas de prensa: "Anatomía del impacto de un jet protoestelar en la Nebulosa de Orión" y "Posible evidencia de formación planetaria en la Nebulosa de Orión".

HH204, un objeto Herbig-Haro fotoionizado de la Nebulosa de Orión. La imagen fue tomada con la cámara WFPC2 del *Telescopio Espacial Hubble*. Las estrellas circundantes han sido enmascaradas en el panel derecho.



## 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.

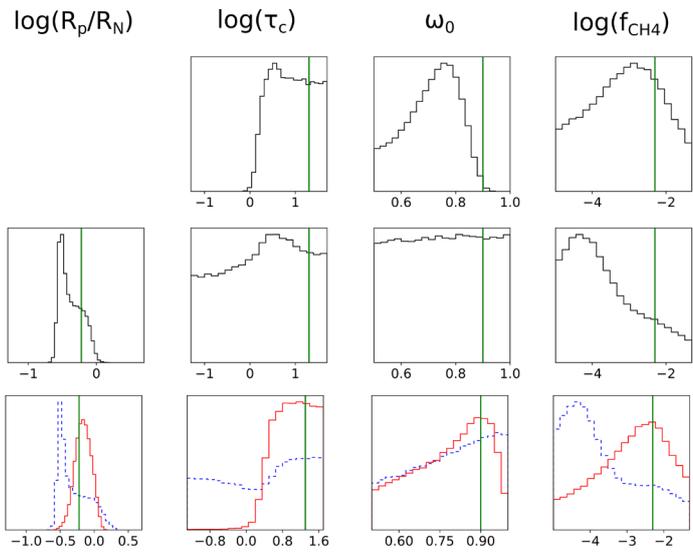
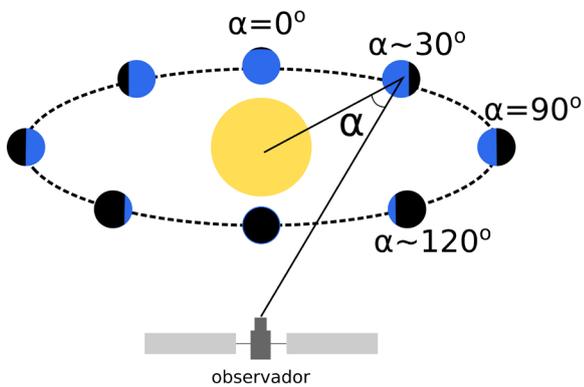
Como parte de esta tesis se ha desarrollado un código de *retrieval* atmosférico para observaciones de exoplanetas en imagen directa de luz reflejada (Carrión-González et al. 2020, A&A, 640, A136). El modelo diseñado incluye parámetros físicos especialmente relevantes para esta técnica tales como el 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 ( $\text{CH}_4$ ). 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  $\text{CH}_4$ ). 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 ( $\alpha$ , 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 ( $\tau_c$ ), el single-scattering albedo de los aerosoles de la nube ( $\omega_0$ ) y la abundancia de metano en la atmósfera ( $f_{CH_4}$ ). Fila superior: una única observación a fase  $0^\circ$ , 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  $0^\circ$ .  $R_p$  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 ( $90^\circ$ ), 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.