

## El Observatorio Astronómico: un diálogo entre ciencia y arquitectura

Autor: Miguel Ángel Castro Tirado  
(macastrotirado@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Javier Boned Purkiss y Alberto Javier Castro-Tirado

Centro: Universidad de Málaga

Fecha de lectura: 19 de julio de 2019

Esta tesis doctoral aborda el desarrollo del observatorio astronómico a lo largo de la historia, desde el punto de vista arquitectónico, como edificio en relación con los instrumentos de observación y su funcionamiento como centro de trabajo heterogéneo. Teniendo en cuenta el impacto de la propia construcción o sus instalaciones sobre los resultados de la investigación (estabilidad térmica o estructural, mala protección climática, turbulencias...), se presta poca atención a desarrollar teorías o estudios de los aspectos arquitectónicos o constructivos de los observatorios. Este trabajo presenta un aporte teórico-crítico que, al menos, invita a la reflexión de los involucrados en el desarrollo de los observatorios astronómicos en el futuro.

Se presenta una aproximación desde el prisma de la arquitectura del propio edificio, dejando de lado otros aspectos como su equipamiento astronómico o su posible uso científico. Es decir, se estudian las particularidades relacionadas con la construcción en la que se ubican los instrumentos y cuya finalidad es la función astronómica.

El análisis se limitó a los observatorios astronómicos ópticos. Esta investigación se remonta hasta las civilizaciones antiguas, presentando los precedentes de lo que posteriormente serían los observatorios astronómicos. El ordenamiento cronológico de los observatorios organizados en tres épocas (islámico-medieval, moderno y contemporáneo) tiene como objetivo facilitar la comprensión de su desarrollo temporal agrupándolos según aspectos fundamentales y limitándolos según puntos de inflexión trascendentes.

### Una nueva tipología propuesta de observatorios astronómicos

El desarrollo de la astronomía y su tecnología especializada condujo a una evolución no planificada del observatorio astronómico. Estos cambios se han consolidado a través de un proceso de prueba y error en el que se descartaron ciertas innovaciones, se consolidaron algunas características nuevas y otras modificaciones reemplazaron soluciones preexistentes.

En definitiva, los atributos que definen a un observatorio astronómico son: i) su condición de edificación y, como tal, habitable; ii) que su función principal es astronómica; y iii) que su arquitectura (espacio y construcción) está caracterizada por los diferentes usos de la astronomía.

Si bien algunos de los tipos de observatorios astronómicos han quedado obsoletos y un diseño basado en sus características carecería de sentido en la actualidad, el desarrollo impredecible que puede presentar la astronomía o la innovación tecnológica podría incluso devolverles una improbable vigencia. Por otro lado, no existe un único tipo válido para el observatorio actual, ya que cada variante puede adaptarse mejor a las circunstancias que definen un centro astronómico en particular. Su configuración dependerá del grado de profesionalización, la ubicación, el tamaño de los instrumentos, el programa de usos...

En cualquier caso, el análisis tipológico del observatorio constituye una herramienta para su estudio histórico y para un mejor

conocimiento de su condición. Por ello, esta tesis estudia los rasgos que definen estos centros y propone 10 tipos en el desarrollo de los observatorios astronómicos a lo largo de la historia. Esto permite un conocimiento profundo de su desarrollo y los atributos que lo definen de utilidad para afrontar el proyecto de un futuro observatorio, independientemente de su escala, presupuesto o profesionalización.

Aun así, la evolución de los observatorios ha estado fuertemente marcada por los avances técnicos y por el progreso astronómico, de modo que tanto el desarrollo tecnológico como los nuevos descubrimientos de la ciencia pueden producir nuevas condiciones o requerir diferentes soluciones que alteren los tipos presentados o, incluso, generen otros nuevos.

### Sobre la evolución del observatorio astronómico

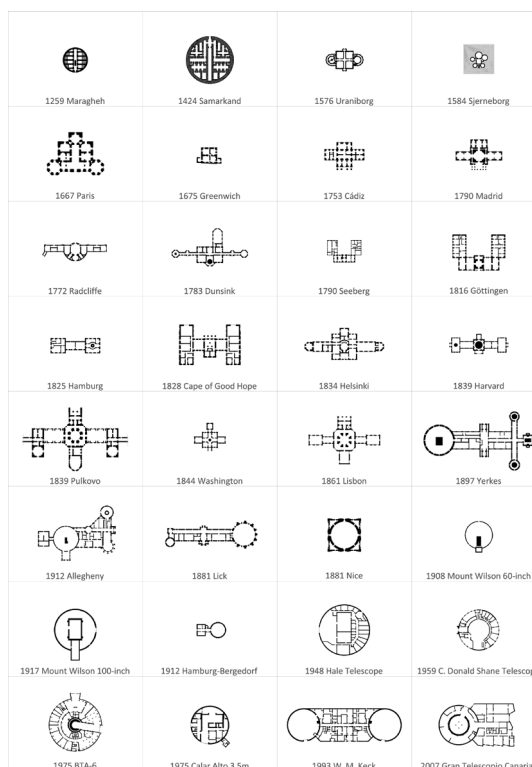
Esta tesis analiza más de 50 observatorios (1259-2007) siguiendo sus avances cronológicamente hasta encontrar evidencias una evolución presente en dos direcciones opuestas: continuar con la disociación de instrumentos astronómicos de otras funciones relacionadas con la investigación y reunificar usos heterogéneos en un mismo edificio.

La primera posibilidad implicaría una escisión de lo que ahora se conoce como observatorio para dar lugar a un par de edificios, uno de ellos con espacios para el personal u otros servicios y otro, separado e independiente, que no tendría relación con la actividad humana.

La segunda posibilidad pasaría por unificar en un solo edificio tanto las funciones estrictamente intrínsecas de la investigación astronómica como el resto de usos y servicios asociados a los trabajadores del centro o incluso a los visitantes, dando lugar a una construcción unitaria más compleja.

A lo largo de esta tesis doctoral se presentan numerosos casos que demuestran que los mayores y más importantes avances en el diseño de observatorios se han producido tras la colaboración entre los arquitectos responsables del proyecto de edificación y los astrónomos que llevarían a cabo la investigación en el edificio. Es decir, cuando el observatorio se ha entendido como el resultado de una relación equilibrada entre astronomía y arquitectura.

En este siglo XXI es el momento de recuperar el diálogo entre Astronomía y Arquitectura.



Plantas principales representadas a la misma escala de los observatorios astronómicos más representativos de sus periodos.

# Estudio observacional de moléculas precursoras para la formación de polvo en envolturas circunestelares

Autora: Sarah Massalkhi  
(sarah.massalkhi@csic.es)

Tesis doctoral dirigida por:  
Marcelino Agúndez y José Cernicharo  
Centro: Universidad Autónoma de Madrid  
Fecha de lectura: 18 de diciembre de 2020

La fase de la rama asintótica de gigantes (AGB, por sus siglas en inglés) es una etapa tardía en la evolución de las estrellas de masa baja a intermedia. Durante esta fase, las estrellas pierden copiosas cantidades de material a través de vientos estelares densos y lentos que dan lugar a una envoltura circunestelar extensa que rodea a la estrella central. Estas envolturas son entornos astrofísicos notables ya que en ellos tiene lugar la formación de muy diversas moléculas así como de granos de polvo. Este material circunestelar será finalmente expulsado hacia el exterior y será la principal fuente de enriquecimiento del medio interestelar, proporcionando así las piezas para la construcción de una nueva generación de estrellas y planetas.

Uno de los principales ingredientes del material circunestelar es el polvo. Sin embargo, cómo ocurre el proceso de formación del polvo sigue siendo un misterio. Preguntas como ¿cuáles son los componentes básicos en fase gaseosa que dan lugar a los primeros núcleos de condensación? y ¿cómo estas partículas de tamaño intermedio evolucionan hacia granos de tamaño micrométrico? permanecen aún sin respuesta. Estas preguntas están en el corazón de *NANOCOSMOS*, el proyecto ERC *Synergy* dentro del cual se ha realizado esta tesis, que tiene como objetivo comprender mejor los procesos físicos y químicos que gobiernan la formación y evolución del polvo cósmico, principalmente desde un punto de vista observacional. El trabajo que se presenta en esta tesis se basa en la obtención y análisis de espectros en el rango de longitudes de onda milimétricas con el fin de estudiar el gas molecular en envolturas circunestelares alrededor de estrellas AGB. El objetivo de las observaciones es buscar la emisión de posibles candidatos que podrían actuar como precursores del polvo en fase gaseosa

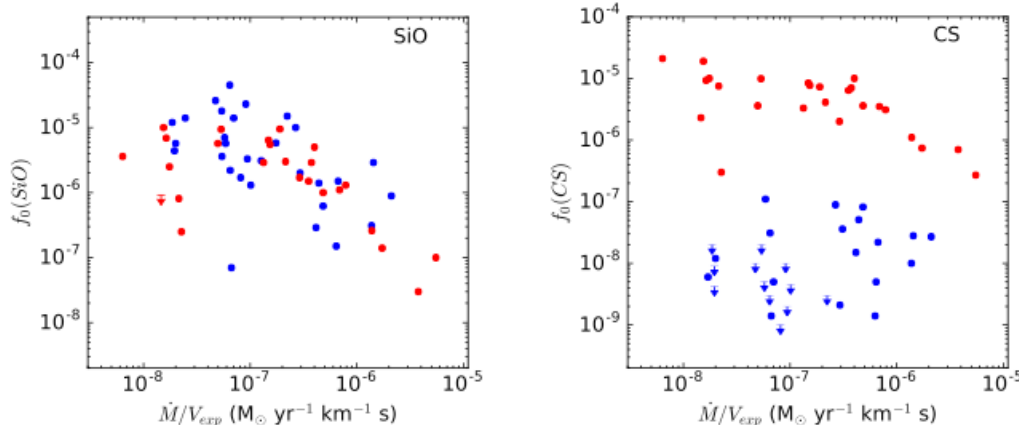
alrededor de las estrellas AGB e investigar la importancia de su papel en la formación del polvo. Por esta razón, realizamos observaciones de alta sensibilidad de una gran muestra de estrellas AGB en la banda de 2 mm utilizando el radiotelescopio de treinta metros de diámetro de IRAM. La muestra de objetos observados contiene tanto envolturas ricas en carbono como ricas en oxígeno y abarca un amplio rango de tasas de pérdida de masa y propiedades circunestelares. Hemos buscado la emisión de las moléculas SiC<sub>2</sub>, SiO, SiS y CS en 25 envolturas ricas en carbono, y de las moléculas SiO, SiS, CS, SO y SO<sub>2</sub> en una muestra de 30 envolturas ricas en oxígeno. Hemos construido modelos de excitación fuera del equilibrio termodinámico y transporte de radiación con objeto de reproducir las líneas observadas y determinar la abundancia con respecto a H<sub>2</sub> de estas moléculas. Destacamos que para la mayor parte de moléculas observadas, esta es la primera vez que se determina de forma coherente su abundancia en una muestra estadísticamente significativa.

Entre los resultados más interesantes encontrados, este estudio revela una clara correlación entre la abundancia de ciertas moléculas y la densidad de la envoltura. En concreto, en envolturas ricas en carbono la abundancia de SiC<sub>2</sub>, SiO y CS disminuye a medida que aumenta la densidad de la envoltura. Esta correlación se interpreta como una evidencia de la desaparición de estas moléculas de la fase gas para pasar a formar parte de granos de polvo, proceso que es favorecido al aumentar la densidad debido al mayor ritmo de colisiones entre partículas. Por lo tanto, SiC<sub>2</sub>, SiO, y CS son fuertes candidatos a actuar como precursores de polvo en envolturas ricas en carbono. En el caso de envolturas ricas en oxígeno, la abundancia de SiO muestra también una clara correlación con la densidad de la envoltura en la que al aumentar la densidad la abundancia de estas moléculas disminuye. Por lo tanto, SiO es un claro candidato a precursor de polvo en envolturas ricas en oxígeno.

Otro resultado interesante es ver cómo se comporta la abundancia de cada molécula dependiendo del carácter rico en carbono o rico en oxígeno de la envoltura. Así, las moléculas CS y SiS muestran una clara diferenciación entre estos dos tipos de envolturas, siendo significativamente más abundantes en envolturas ricas en carbono que en envolturas ricas en oxígeno. Por otra parte, la molécula de SiO parece no verse afectada por el hecho de encontrarse en un ambiente rico en carbono o rico en oxígeno. Algunos de estos hechos pueden explicarse mediante modelos de equilibrio químico, aunque otros son difícilmente explicables mediante estos modelos, lo que apunta a procesos químicos fuera del equilibrio como importantes agentes reguladores de la composición química en las regiones internas de envolturas circunestelares de estrellas AGB.

Tesis disponible en <https://repositorio.uam.es/handle/10486/694426>

Abundancia relativa a H<sub>2</sub> de las moléculas SiO (izquierda) y CS (derecha) en la muestra de envolturas ricas en carbono (puntos rojos) y la muestra de envolturas ricas en oxígeno (puntos azules) en función del parámetro  $\dot{M}/V_{exp}$ , que es una medida de la densidad. Se aprecia cómo al aumentar la densidad disminuye la abundancia de SiO en los dos tipos de envoltura y la de CS en envolturas ricas en carbono. Se aprecia también cómo CS muestra una clara diferenciación entre envolturas ricas en carbono y ricas en oxígeno mientras que esto no ocurre para SiO.



## Discos y jets en la formación de sistemas estelares múltiples

Autora: Ana Karla Díaz Rodríguez

(ana.diazrodriguez@manchester.ac.uk)

Tesis doctoral dirigida por: Guillem Anglada Pons

Centro: Instituto de Astrofísica de Andalucía

Fecha de lectura: 10 de febrero de 2021

Nuestro objetivo general es estudiar las primeras etapas del proceso de formación estelar en sistemas múltiples. Para ello analizamos dos aspectos complementarios de la formación múltiple de estrellas: la formación simultánea de protoestrellas en un cúmulo, y la formación de un sistema binario individual.

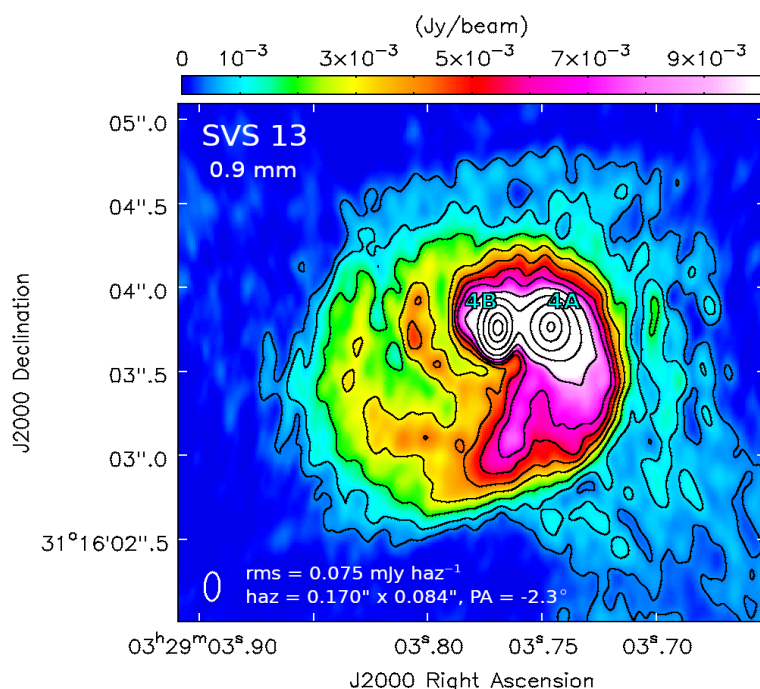
En primer lugar, presentamos observaciones multibanda (0,7-5 cm) y multiépoca (1994-2015) del VLA hacia la región que contiene las fuentes de IR lejano FIR 3 (HOPS 370) y FIR 4 (HOPS 108) en la Nube Molecular de Orión 2 (OMC-2). Reportamos la detección de diez fuentes de radio, siete de ellas identificadas como objetos estelares jóvenes (YSOs). Obtenemos la imagen del radio *jet* muy bien colimado (VLA 11) con emisión térmica libre-libre en su núcleo, asociado con la protoestrella de Clase I HOPS 370, de masa intermedia. El *jet* presenta varios nudos de emisión no térmica (probablemente sincrotrón debido al choque de electrones relativistas) a distancias de ~7500-12500 unidades astronómicas (au) de la protoestrella, en una región donde otros trazadores de choque han sido previamente identificados. Mostramos que estos nudos se están alejando de la protoestrella HOPS 370 a ~100 km/s. La protoestrella de Clase 0 HOPS 108, que detectamos como una fuente de radio independiente, cinemáticamente desacoplada del *jet*, cae en el camino de estos nudos no térmicos. Estos resultados favorecen el escenario propuesto anteriormente donde la formación de HOPS 108 ha sido desencadenada por el impacto del *jet* de HOPS 370 con el material denso a su alrededor. Sin embargo, HOPS 108 presenta una velocidad de movimiento propia aparente de ~30 km/s, similar a la de otras estrellas "fugitivas" en Orión, cuyo origen es desconcertante.

Más adelante, ampliamos nuestro estudio a todo el campo de visión de esas observaciones, una porción de 12,5' de longitud del Filamento con Forma de Integral (ISF) que contiene todo OMC-2 y los 2,5' más al sur de OMC-3. Reportamos 47 fuentes de radio adicionales, 23 de las cuales se presentan aquí por primera vez. Para estas 47 fuentes de radio, reportamos sus posiciones, densidades de flujo e índices espectrales. Discutimos su naturaleza analizando su índice espectral de radio, morfología, emisión a otras longitudes de onda, posición relativa al ISF y asociación con condensaciones de polvo. Concluimos que, del total de 57 fuentes de radio en el campo de visión, 41 (72%) están muy probablemente asociadas con la

El sistema protobinario SVS 13 visto con ALMA a 0,9 mm. Los dos picos de emisión están asociados con las fuentes centimétricas previamente identificadas VLA 4A y VLA 4B, y están rodeados por emisión extendida en forma de espirales. La imagen se ha realizado con pesado Briggs, con robust = 0,5. Los contornos son -6, 6, 12, 24, 40, 56, 72, 88, 120, 200, 400, 800 y 1200 veces 0,075 mJy haz<sup>-1</sup>, el valor del rms de la imagen. El haz sintetizado (0,170" x 0,084", PA = -2,3°) se muestra en la esquina inferior izquierda de la imagen. La imagen está corregida por la respuesta del haz primario de la antena.

región de formación estelar, seis son fuentes de fondo extragalácticas, y no estamos seguros de la asociación con la región de las diez fuentes restantes. De las 41 fuentes asociadas con la región de formación estelar, 36 están trazando la posición de YSOs, tres están trazando la emisión no térmica de los nudos de un *jet*, una está trazando la pared ionizada por choques de una cavidad y una podría ser un YSO o un nudo de un *jet*. Identificamos de forma clara la emisión de radio continuo de las fuentes impulsoras de los nueve chorros moleculares previamente reportados en nuestro campo de visión. Para cuatro de estas fuentes resolvemos claramente su morfología alargada característica de los radio *jets*. Detectamos emisión térmica libre-libre proveniente de dos YSOs de Clase III que podría estar trazando sus discos fotoevaporados. Encontramos signos de variabilidad en trece fuentes de radio, siete de las cuales también son variables en longitudes de onda más cortas (infrarrojo cercano/óptico/rayos X). Encontramos siete pares de fuentes de radio con una separación proyectada <3000 au, que constituyen potenciales sistemas binarios; teniendo en cuenta fuentes adicionales detectadas a otras longitudes de onda, identificamos un total de 17 potenciales sistemas múltiples en nuestro campo de visión en ese rango de separación.

Finalmente, estudiamos con ALMA el sistema binario cerrado SVS 13, con componentes separadas 90 au. Detectamos al menos dos discos circunestelares de polvo y gas, y un disco circumbinario con prominentes brazos espirales que parece estar en las primeras etapas de formación. La emisión de polvo parece más intensa y compacta hacia la componente VLA 4B, mientras que la VLA 4A parece estar asociada con una mayor cantidad de polvo y con transiciones moleculares más intensas. Estimamos temperaturas rotacionales y densidades de columnas moleculares, indicando altas temperaturas y una rica química. Las transiciones moleculares típicas de los *corinos* calientes se detectan hacia las dos componentes VLA 4A y VLA 4B. A partir de la emisión de polvo observada y la información cinemática estimamos la orientación del sistema, las masas estelares y las de sus discos asociados. Nuestro análisis de los movimientos propios y la cinemática de los discos sugiere que hasta cuatro objetos estelares, uno de ellos una estrella visible, podrían estar presentes dentro de una región de tamaño <100 au. En resumen, SVS 13 parece ser un excelente caso de estudio con el que contrastar simulaciones numéricas de las primeras etapas de la formación de sistemas binarios y múltiples.





# Caracterización de la alta atmósfera de exoplanetas que sufren escape atmosférico hidrodinámico

Autor: Manuel Lampón González-Albo (mlampon@iaa.es)

Tesis doctoral dirigida por: Manuel López Puertas

Centro: Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) / Universidad de Granada

Fecha de lectura: 24 de marzo de 2021

Se estima que un gran número de planetas sufre escape atmosférico hidrodinámico en alguna etapa de su vida. Los planetas que se encuentran en esta etapa de gran expansión atmosférica pueden experimentar un gran cambio en su masa, en su radio, en su composición atmosférica e incluso pueden evolucionar a una clase planetaria diferente. Por lo tanto, este mecanismo juega un papel crucial en la formación y evolución de los planetas, así como en el origen de la diversidad planetaria observada.

La falta de observaciones en planetas que están sufriendo escape hidrodinámico dificulta seriamente su caracterización atmosférica y limita la comprensión de este proceso. Una de las principales deficiencias en el conocimiento de este tipo de escape es la falta de confirmación de los tres regímenes hidrodinámicos que han sido identificados de forma teórica: limitado por la energía, limitado por recombinación y limitado por el número de fotones (en inglés, *energy-limited*, *recombination-limited* y *photon-limited*), ya que actualmente no se ha obtenido ninguna prueba observacional de su existencia. Sin embargo, recientemente se han tomado medidas de alta resolución de las líneas de absorción del triplete de He I a 10830 Å en planetas intensamente irradiados por su estrella, por lo que se abre una nueva ventana para el estudio del escape atmosférico.

La finalidad de esta tesis es contribuir al conocimiento en el ámbito de las ciencias planetarias a través del estudio de la alta atmósfera de planetas gigantes que sufren escape atmosférico hidrodinámico. Nuestros objetivos son 1) mejorar la caracterización de la alta atmósfera de una muestra de exoplanetas que están experimentando escape hidrodinámico. Esta muestra está compuesta por los exoplanetas tipo Júpiter caliente HD209458b y HD189733b, y por el exoplaneta tipo Neptuno caliente GJ3470b; 2) realizar un análisis comparativo entre estos exoplanetas con el fin de comprender mejor el proceso de escape hidrodinámico; y 3) investigar su régimen hidrodinámico. Para alcanzar los objetivos de la tesis, hemos participado en el proyecto CARMENES He I, una colaboración dentro del Consorcio de CARMENES para observar el He I en atmósferas exoplanetarias mediante el espectrógrafo de alta resolución CARMENES. Como parte del grupo de trabajo dedicado al estudio de atmósferas, hemos sido de los primeros a nivel mundial en obtener este tipo de medidas. Para analizar estas observaciones, hemos desarrollado un modelo hidrodinámico 1D con simetría esférica para describir la alta atmósfera de los exoplanetas, y lo hemos acoplado a un modelo termodinámico de desequilibrio para el cálculo de la población del He triplete. Además, hemos realizado un modelo de transferencia radiativa de alta resolución para calcular el espectro sintético de las líneas del triplete de He y analizar el espectro de absorción medido. De este análisis extraemos información de parámetros atmosféricos tales como la tasa de pérdida de masa, la temperatura de la termosfera y el perfil de densidad del triplete de He. Para romper la degeneración existente entre algunos de

estos parámetros, hemos utilizado observaciones previamente publicadas de la línea Lyman-alpha de estos exoplanetas.

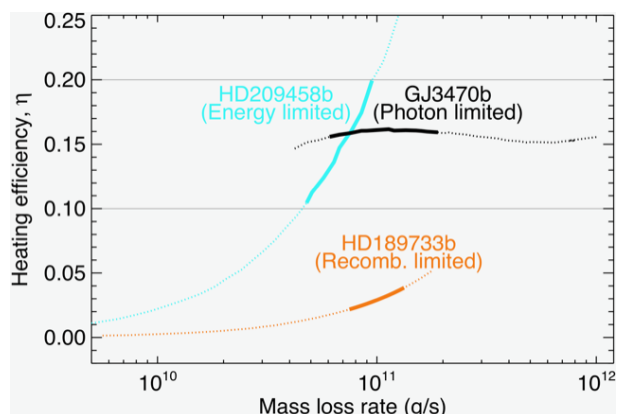
Entre los resultados obtenidos, encontramos que la alta atmósfera de HD189733b es caliente y compacta, tiene una temperatura máxima de 12100-12800 K y una composición determinada por la proporción H/He= $((99,2/0,8) \pm 0,1)$ , se escapa con una velocidad baja, está altamente ionizada y sufre una tasa de pérdida de masa de  $(0,98-1,15) \times 10^{11} \text{ g s}^{-1}$ . Por el contrario, la alta atmósfera de GJ3470b está muy extendida, es relativamente fría, con una temperatura máxima de  $5100 \pm 900 \text{ K}$ , tiene un H/He= $((98,5/1,5) \pm 1,5)$ , se expande a una velocidad muy alta, está moderadamente ionizada y pierde masa a un ritmo de  $(1,87 \pm 1,13) \times 10^{11} \text{ g s}^{-1}$ . La alta atmósfera de HD209458b parece un caso intermedio entre las de HD189733b y GJ3470b, ya que está moderadamente extendida, tiene una temperatura máxima de  $7625 \pm 500 \text{ K}$ ; tiene un H/He= $98/2$ ; escapa a una velocidad moderada y pierde masa a un ritmo de  $(0,71 \pm 0,29) \times 10^{11} \text{ g s}^{-1}$ .

Atendiendo a los perfiles de densidad del H, encontramos que mientras la recombinación es el proceso que gobierna en toda la atmósfera de HD189733b, la advección domina completamente en la de GJ3470b, no siendo ninguno de estos procesos despreciable en la alta atmósfera de HD209458b. Aparte de obtener buenas estimaciones de los principales parámetros atmosféricos de estos exoplanetas, hemos podido confirmar que GJ3470b sufre escape hidrodinámico.

Además, hemos proporcionado la primera estimación observacional de la proporción de H/He en un exoplaneta. Nuestras estimaciones de H/He en los tres exoplanetas sugieren que la alta atmósfera de planetas gigantes que sufren escape hidrodinámico tienden a tener una masa molecular media muy baja (H/He mayor que 97/3).

Por otro lado, presentamos pruebas observacionales de los diferentes regímenes hidrodinámicos en atmósferas ricas en hidrógeno. En concreto, mostramos que HD209458b se encuentra en el régimen limitado por la energía, HD189733b en el régimen limitado por la recombinación y GJ3470b en el limitado por el número de fotones. De acuerdo con estos resultados, proponemos estos exoplanetas como arquetipos para sus respectivos regímenes. Concluimos que este trabajo mejora significativamente la caracterización de la alta atmósfera de los exoplanetas que componen nuestra muestra, al igual que mejora nuestro conocimiento sobre el proceso de escape atmosférico hidrodinámico.

Tesis disponible en: [https://www.iaa.csic.es/sites/default/files/thesis/iaa\\_2021\\_tesis\\_m\\_lampon.pdf](https://www.iaa.csic.es/sites/default/files/thesis/iaa_2021_tesis_m_lampon.pdf)



Eficiencia de calentamiento de la alta atmósfera del planeta respecto a su tasa de pérdida de masa. Esta relación muestra la eficiencia con la que se genera el escape atmosférico del planeta a partir del flujo estelar incidente y revela a su vez el régimen hidrodinámico en el que se encuentra cada uno de los exoplanetas estudiados.

## Detección, caracterización y uso de cúmulos abiertos en un contexto Galáctico en un entorno *Big Data*

Autor: Alfred Castro Ginard

Tesis doctoral dirigida por: Xavier Luri y

Carme Jordi

Centro: Universitat de Barcelona

Fecha de lectura: 30 de abril de 2021

Los cúmulos estelares abiertos son conjuntos de estrellas, ligadas gravitacionalmente, nacidas de la misma nube de gas molecular que tienen posiciones, cinemática, edades y metalicidades similares. Los métodos tradicionales para la búsqueda de cúmulos abiertos se basan en la inspección visual de regiones del cielo buscando sobredensidades posicionales y comprobando que sus estrellas siguen una isócrona en un diagrama de color-magnitud. El segundo lanzamiento de datos de *Gaia*, con más de 1300 millones de estrellas con medidas de paralaje y movimiento propio junto con fotometría en tres bandas, ha catapultado el desarrollo de novedosas técnicas basadas en *machine learning* para automatizar la detección de cúmulos abiertos, usando información tanto astrométrica como fotométrica.

La caracterización de los cúmulos abiertos nos permite conocer propiedades del disco Galáctico tales como la estructura y evolución de los brazos espirales, o la comprobación de estudios sobre evolución estelar, ya que los parámetros astrofísicos de los cúmulos se pueden estimar con una precisión mayor que para estrellas de campo individuales. Por esto, una buena caracterización de la población de cúmulos abiertos en la Vía Láctea es clave para estudios de arqueología Galáctica.

Nuestro objetivo para esta tesis es transformar los métodos clásicos para la detección de diferentes tipos de patrones en datos astronómicos, que mayoritariamente dependen de la inspección visual, a métodos automáticos de minería de datos para extraer información útil de catálogos estelares. También usaremos el resultado de la aplicación de técnicas de *machine learning* a los datos de *Gaia* en un contexto Galáctico más amplio.

Hemos desarrollado una metodología de minería de datos para la búsqueda a ciegas de cúmulos abiertos en el disco Galáctico. Primero, usamos un algoritmo basado en densidad, DBSCAN, para buscar sobredensidades estelares en el espacio astrométrico de cinco dimensiones de *Gaia*. El despliegue del método de detección en un entorno de *Big Data*, en el superordenador *MareNostrum* colocado en el *Barcelona Supercomputing Center*, evita que la búsqueda esté limitada por restricciones computacionales. Después, las sobredensidades detectadas son clasificadas en simples sobredensidades estadísticas o estructuras físicas usando una red neuronal artificial entrenada para reconocer las isócronas que los cúmulos abiertos forman en un diagrama de color-magnitud.

Para toda la población de cúmulos abiertos, estimamos los parámetros astrofísicos tales como edad, distancia y extinción en la línea de visión usando una red neuronal artificial entrenada en cúmulos abiertos bien estudiados. Usamos esta

información, junto con velocidades radiales medias para cada cúmulo, para trazar la estructura espiral de nuestra Galaxia usando *GaussianMixtureModels* para asociar los cúmulos más jóvenes ( $< 30$  My) al brazo espiral donde se han formado. También describimos la evolución de los brazos espirales durante los últimos 80 My para dar nuevas pistas sobre la naturaleza de la estructura espiral de la Vía Láctea.

La automatización del procedimiento de detección de cúmulos abiertos, junto con su despliegue en un entorno de *Big Data*, ha resultado en más de 650 nuevos cúmulos abiertos detectados con este método. Los nuevos cúmulos UBC representan un tercio del censo total de cúmulos abiertos actualmente conocido y es la mayor contribución individual al catálogo de cúmulos abiertos.

Somos capaces de añadir 264 cúmulos abiertos jóvenes a las 84 regiones de formación estelar de alta masa que se han usado tradicionalmente para trazar los brazos espirales, para incrementar el rango en azimut Galáctico donde los brazos espirales están definidos y estimar mejor sus parámetros. Analizando la distribución de cúmulos abiertos a través de los brazos espirales y calculando las diferentes velocidades de estos brazos somos capaces de desfavorecer las clásicas ondas de densidad como el mecanismo principal de formación de los brazos espirales de la Vía Láctea, favoreciendo un comportamiento transitorio.

Con esta tesis hemos mostrado que el uso de *machine learning*, con un tratamiento correcto de los recursos computacionales, tiene un largo viaje por delante en un futuro de la Astrofísica dominada por los datos.

Tesis disponible en: <https://www.tesisenred.net/handle/10803/671790#page=1>

# Sistemas planetarios orbitando enanas rojas y actividad de sus estrellas anfitrionas

Autor: Rafael Luque Ramírez (rluque@iaa.es)

Tesis doctoral dirigida por: Enric Pallé y Grzegorz Nowak

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias / Universidad de La Laguna

Fecha de lectura: 25 de mayo de 2021

Uno de los campos más apasionantes de la ciencia hoy en día es el estudio de los exoplanetas, que cautivan la imaginación no solo de la comunidad astronómica sino también de la sociedad en general. Identificar exoplanetas como la Tierra y encontrar biomarcadores en sus atmósferas está entre los principales objetivos de la astronomía para este siglo, motivando el desarrollo y construcción de ambiciosas misiones espaciales y telescopios en tierra de enormes dimensiones. Los planetas pequeños y rocosos orbitando estrellas de tipo espectral M, también conocidas como enanas rojas, son los únicos candidatos similares a la Tierra cuyas atmósferas se pueden estudiar con la tecnología actual. Además, son los mejores, si no los únicos, candidatos para detectar signos de vida en ellos con la próxima generación de instrumentos.

Esta tesis se centra en el descubrimiento y caracterización de planetas pequeños en torno a enanas rojas. Las enanas rojas componen el 70% de las estrellas de nuestra Galaxia y debido a su pequeña masa y tamaño ofrecen varias ventajas para la detección y caracterización de exoplanetas usando las dos técnicas más comunes y exitosas: el método de tránsito y el de las velocidades radiales. El objetivo principal de este trabajo es aprovechar la oportunidad que ofrecen este tipo de estrellas para descubrir y estudiar los mejores candidatos para el estudio de atmósferas exoplanetarias con instrumentos venideros usando la sinergia entre misiones espaciales que buscan planetas transitantes y espectrógrafos de alta resolución en tierra. Para ello, se han desarrollado nuevos métodos analíticos para la determinación del mejor modelo de ajuste de los datos usando estadística Bayesiana y el modelado de la actividad estelar usando procesos Gaussianos.

Los resultados de la tesis incluyen la detección y caracterización de dos supertierras orbitando las enanas rojas GJ 3779 y GJ 1265 usando el espectrógrafo CARMENES (Luque et al., 2018), y dos sistemas multiplanetarios (Luque et al., 2019b, 2021) cuyos planetas se detectaron en tránsito por el telescopio espacial TESS y han sido confirmados y caracterizados con una batería de instrumentos en tierra. Además de estos trabajos sobre sistemas planetarios orbitando enanas rojas, la tesis incluye publicaciones adicionales acerca de la detección y caracterización de planetas en torno a otros tipos de estrella (como las de tipo solar —Luque et al., 2019a- y las gigantes rojas —Luque et al., 2019c-) y el análisis de la composición química de la atmósfera del “Júpiter caliente” WASP-74 (Luque et al., 2020).

El descubrimiento del sistema multiplanetario alrededor de la brillante enana roja GJ 357 es uno de los resultados más

destacados de esta tesis. El planeta más cercano a su estrella, GJ 357 b, es un planeta caliente con una densidad similar a la Tierra que se ha convertido en el tercer planeta transitante más cercano al nuestro. El próximo año el telescopio espacial JWST estudiará la atmósfera de GJ 357 b, lo que permitirá conocer la composición química de este tipo de planetas llamados “tierras calientes” por primera vez. El análisis de las velocidades radiales de la estrella reveló dos planetas adicionales de tipo supertierra en órbitas externas, estando el más alejado en la “zona habitable”, es decir, en el rango de órbitas donde el agua podría mantenerse en estado líquido en su superficie.

En total, nueve nuevos planetas en seis sistemas extrasolares se han descubierto y analizado como primer autor de los artículos que componen esta tesis. Al comienzo de esta tesis, en enero de 2018, solo se conocían doce planetas orbitando enanas rojas con medidas precisas de su masa y radio. Tras su finalización, el número ha incrementado hasta 33, siendo más de la mitad de las nuevas incorporaciones parte del trabajo de esta tesis (como autor principal o co-autor). Las nuevas incorporaciones no solo han permitido encontrar candidatos apropiados para estudios atmosféricos, especialmente con el telescopio espacial JWST, sino que también nos ayudan a comprender la composición, origen y evolución de esta población de una forma global. Los resultados y las técnicas desarrolladas en esta tesis contribuyen a mejorar nuestro conocimiento acerca del tipo de planeta más frecuente en el Universo, los planetas rocosos orbitando enanas rojas, y su potencial para albergar condiciones propicias para la vida.

Tesis disponible en: <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFichaConsulta.do?idFicha=658776>

## El Universo de bajo brillo superficial: la última frontera

Autor: Raúl Infante Sainz

(infantesainz@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Ignacio Trujillo

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias /  
Universidad de La Laguna

Fecha de lectura: 18 de junio de 2021

El estudio del Universo de bajo brillo superficial supone una de las mayores oportunidades de descubrimientos en la Astronomía actual. Sin embargo, las técnicas tradicionales para reducir y tratar los datos astronómicos no son capaces de proporcionar imágenes en las que las estructuras de bajo brillo superficial puedan ser analizadas y estudiadas con suficiente nivel de detalle. Ir más profundo de 30 mag arcsec<sup>-2</sup> implica observar estructuras ~1500 veces más débiles que el brillo del cielo más oscuro de la Tierra, y múltiples efectos sistemáticos lo hacen muy difícil (por ejemplo, el campo plano, la sobresubstracción del fondo del cielo, las reflexiones internas, la luz dispersada, los cirros Galácticos, etc.). En esta tesis se ha

llevado a cabo una exploración del Universo de bajo brillo superficial con especial énfasis en los apartados más técnicos.

Para corregir los efectos sistemáticos y poder estudiar las estructuras de bajo brillo superficial, se han desarrollado, mejorado y aplicado muchas técnicas a una gran cantidad de datos de telescopios muy diferentes. Se ha prestado especial atención al efecto de la función de dispersión de punto (PSF) para corregir la luz dispersada en las imágenes astronómicas. Un resultado notable es la detección de una estructura estelar de marea muy débil de la galaxia NGC 1052-DF4. Esto revela que la galaxia NGC 1052-DF4 está interactuando con otra galaxia cercana, explicando así su sorprendente falta de materia oscura. Las técnicas y herramientas desarrolladas están pensadas para ser utilizadas en la próxima generación de telescopios y cartografiados profundos con el objetivo de mejorar la calidad de los datos. Junto al desarrollo de esta tesis, también se ha desarrollado y madurado un programa para realizar investigaciones reproducibles: *Maneage* (del inglés, *Managing data Lineage*). El objetivo de *Maneage* es proporcionar un entorno totalmente controlado para llevar a cabo estudios científicos reproducibles. En este sentido, la práctica totalidad de las reducciones y el análisis de los datos astronómicos en esta tesis se han realizado utilizando *Maneage*.

Tesis disponible en: correo electrónico a infantesainz@gmail.com



Arriba izquierda: Imagen de la galaxia NGC 4565 observada con la cámara PAUCam y el telescopio William Herschel (WHT) usando los filtros *g*, *r*, *i* de Sloan. Nótese que en esta imagen hay muchas fuentes cercanas a la galaxia cuya luz contamina las estructuras de bajo brillo superficial, es decir, el halo, la parte externa del disco, etc. La magnitud superficial límite de esta imagen (para cada filtro) es ~30magarcsec<sup>-2</sup>. Arriba derecha: Campo de luz dispersada debido a las estrellas más brillantes (únicamente estrellas más brillantes que 13 magnitudes presentes en el catálogo de Gaia DR2). En esta imagen se muestra cómo aplicando las técnicas desarrolladas y mejoradas en esta tesis es posible obtener imágenes muy profundas. Del mismo modo, construyendo la PSF muy extendida es posible modelar el campo de luz difusa generado por las estrellas presentes en el campo de visión y corregir de este efecto. Una vez modelada esta luz contaminante, se puede eliminar esta contribución y estudiar las estructuras de bajo brillo superficial, como por ejemplo el halo de la galaxia o las partes más externas, que antes no era posible. En ambas imágenes la orientación es norte hacia arriba y este hacia la izquierda.

Derecha: Elementos de la matriz de Mueller de un etalón comercial de niobato de litio en función del ángulo de incidencia y de la longitud de onda. Los coeficientes *a* y *c* se encuentran en la diagonal de la matriz de Mueller y muestran el comportamiento típico del perfil de transmisión con el ángulo de incidencia correspondiente a un dispositivo Fabry-Pérot. Sin embargo, los elementos *b* y *d* se encuentran fuera de la diagonal y producen un desdoblamiento del perfil de transmisión, así como una contaminación de los diferentes parámetros de Stokes y, por tanto, causan señales espurias en la medida del estado de polarización de la luz que pueden a su vez falsear las medidas del campo magnético solar.



# Propiedades espectropolarimétricas y de calidad de imagen de los etalones Fabry-Pérot. Aplicaciones a instrumentación solar

Autor: Francisco Javier Bailén Martínez  
(fbailen@iaa.es)

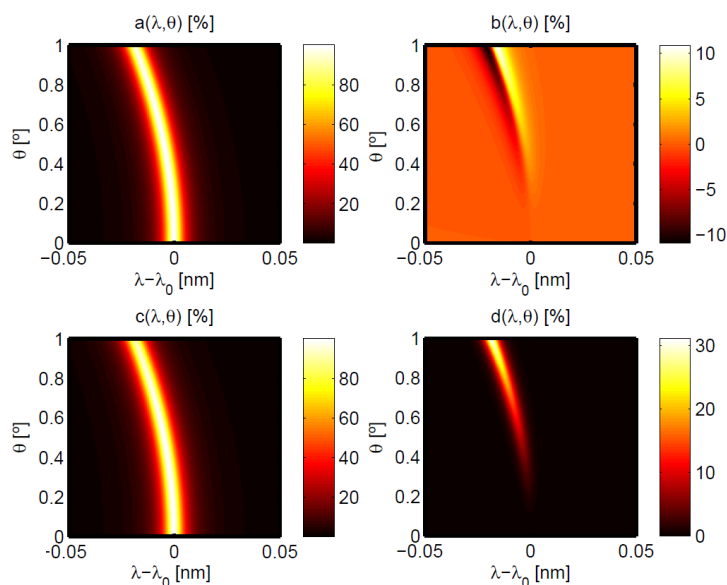
Tesis doctoral dirigida por: David Orozco Suárez y José Carlos del Toro Iniesta

Centro: Instituto de Astrofísica de Andalucía / Universidad de Granada

Fecha de lectura: 25 de junio de 2021

El uso de etalones Fabry-Pérot como filtros sintonizables de banda estrecha ha experimentado un fuerte crecimiento en las últimas décadas en el ámbito de la instrumentación solar. Sin embargo, en la mayoría de estudios hasta la fecha solo se ha evaluado su comportamiento hasta cierto punto —por ejemplo, suponiendo efectos puramente monocromáticos, comportamientos isotropos o iluminación ideal—. En este trabajo abordamos las características espectrales, polarimétricas y de calidad de imagen de los etalones Fabry-Pérot, así como su influencia en espectropolarímetros solares en la configuración colimada y en la telecéntrica, prestando una especial atención a (i) el efecto del ancho de banda finito del etalón, (ii) los posibles efectos birrefringentes que aparecen en etalones sólidos, (iii) las posibles imperfecciones en la iluminación y (iv) el impacto de los defectos de los etalones en las observaciones.

Esta tesis está basada en una compilación de cuatro artículos sobre instrumentos basados en etalones Fabry-Pérot, publicados en *The Astrophysical Journal Supplement Series*. En nuestro primer artículo comenzamos con una revisión general de las características de los etalones. Repasamos el enfoque histórico seguido para evaluar el impacto de las irregularidades e inhomogeneidades de los etalones en el perfil de transmisión y generalizamos las expresiones empleadas más comúnmente con el fin de incluir el impacto de defectos de magnitud arbitraria en etalones tanto cristalinos como de aire. También examinamos su respuesta espectral y la calidad de imagen esperada



para cada configuración, colimada y telecéntrica, incluyendo los efectos policromáticos provocados por el ancho de banda finito del filtro, así como posibles desviaciones de la iluminación respecto a la ideal. En concreto, nos centramos en los efectos de apodización de pupila que ocurren en las monturas telecéntricas y en las consecuencias de las asimetrías, desplazamientos y ensanchamientos inducidos en el perfil de transmisión y en la PSF cuando el etalón está girado respecto al eje óptico del instrumento, cuando se tienen en cuenta errores en el alineamiento de los componentes ópticos, o por desviaciones de la propagación paraxial ideal de la luz a lo largo del instrumento.

En el segundo artículo abordamos la respuesta polarimétrica de etalones sólidos uniaxiales (como los de  $\text{LiNbO}_3$ ) y demostramos que la matriz de Mueller en estos etalones depende solo de cuatro coeficientes espectrales que cambian rápidamente a lo largo del perfil de transmisión y que la respuesta polarimétrica puede formularse como la combinación de las matrices de Mueller de un retardador y de un espejo, correctamente moduladas a lo largo del perfil de transmisión. También incluimos el efecto de tener diferentes orientaciones del plano principal del cristal en cada configuración y formulamos la dependencia explícita de la birrefringencia inducida en cristales uniaxiales con la dirección de la luz incidente y con la orientación del eje óptico.

Por último, evaluamos la respuesta de un etalón de niobato de litio para las monturas colimada y telecéntrica y estudiamos la dependencia de su PSF con la polarización de la luz incidente. En el tercer artículo evaluamos las señales espurias de las velocidades del plasma y del campo magnético debidas a los efectos estudiados en los artículos anteriores: la apodización de pupila que surge en monturas telecéntricas, las asimetrías en la apodización de pupila que aparecen cuando hay imperfecciones en la iluminación de etalones telecéntricos y los efectos birrefringentes que aparecen en las dos configuraciones cuando se usa un etalón uniaxial. Para este fin simulamos un espectropolarímetro en configuraciones similares a las de PHI e IMaX y comparamos las velocidades y campos magnéticos del plasma a lo largo del campo de visión con los obtenidos cuando se supone un comportamiento ideal. Para ello, tenemos en cuenta la localización del etalón dentro del tren óptico y distinguimos entre dos casos importantes: cuando se coloca detrás del polarímetro (como ocurre en instrumentos de doble haz) y cuando se sitúa antes del analizador. Evaluamos también la posible contaminación entre canales ortogonales que aparece en instrumentos de doble haz y mostramos que la birrefringencia tiene un impacto mínimo en la medida del vector de Stokes en comparación con las señales artificiales esperadas por la apodización de pupila.

En el cuarto artículo presentamos una fórmula analítica que describe el campo eléctrico transmitido en la configuración telecéntrica y que ajusta de manera excelente con los resultados obtenidos tras resolver de forma numérica la ecuación del campo eléctrico. Usamos esta expresión para inferir tanto el perfil de transmisión como el frente de onda transmitido. En concreto, obtenemos expresiones para la degradación de frente de onda producida por errores a lo largo de la huella del haz incidente y discutimos la magnitud máxima necesaria para lograr alcanzar el límite de difracción. Para ello, evaluamos la dependencia del error del frente de onda con el número  $f$ , con la reflectividad y con la resolución espectral, a la vez que comparamos de forma cualitativa el comportamiento de las monturas telecéntricas con la esperada en instrumentos colimados atendiendo a consideraciones relacionadas con el tamaño, la calidad y el coste del etalón y del propio instrumento. Por último, proponemos un método para evaluar analíticamente la matriz de Mueller de etalones telecéntricos adaptando la formulación derivada para el caso isotropo.

Tesis disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/244671>



## Nuevas ventanas a la población estelar del centro Galáctico: estudios en múltiples longitudes de onda y en el tiempo

Autora: Aurelia Teresa Gallego Calvente

Tesis doctoral dirigida por: Rainer Schoedel

Centro: Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC)

Fecha de lectura: 8 de julio de 2021

El centro de nuestra Galaxia, la Vía Láctea, será siempre de nuestro interés debido a que su proximidad lo convierte en un laboratorio ideal para poder estudiar fenómenos que luego se pueden extrapolar a otras galaxias. Sin embargo, el estar abarrotado de estrellas hace muy difícil su completa observación y, además, el medio interestelar entre la Tierra y el centro Galáctico es opaco para algunas longitudes de onda, como por ejemplo para la luz visible. Por ello, es cada vez más relevante estudiar el Universo a diferentes frecuencias y en diferentes épocas para poner de manifiesto todos sus aspectos.

De entre todos los distintos tipos de estrellas que conocemos, las *estrellas masivas* son de especial interés debido a varios hechos fundamentales. En primer lugar, su alta masa (comúnmente aceptada mayor a ocho veces la masa de nuestro Sol), que hace que tengan una temperatura central muy elevada y, por lo tanto, una gran luminosidad, da lugar a que estas estrellas evolucionen más rápidamente y vivan menos tiempo que las estrellas de menor masa. Excitan y enriquecen químicamente el medio interestelar en el que se encuentran a través de una intensa radiación ionizante, fuertes vientos y, en particular, al morir en una explosión que se determina como “supernova”. Además, dan origen a objetos de alta energía como estrellas de neutrones o agujeros negros.

Por otro lado, y precisamente por su elevada masa, son raras y difíciles de observar ya que cuanto más masiva es una estrella en menor cantidad se encuentra y, al formarse en las regiones más densas de las nubes moleculares, se hallan envueltas por una gran cantidad de polvo y gas molecular durante las fases iniciales de su vida hasta que llegan a la secuencia principal. A través de estudios observacionales se ha demostrado que la tasa de formación estelar por intervalo de masa depende fundamentalmente de la masa. Esta dependencia se conoce como “función inicial de masa” (IMF, por sus siglas en inglés). Pues bien, para masas mayores a una masa solar, la IMF puede aproximarse a una ley de potencias con la masa como base y el exponente, para estrellas masivas y de masa intermedia, igual a  $-2.35$  (IMF de Salpeter). En entornos extremos como es el caso del centro Galáctico, con fuerzas de marea muy intensas, un campo magnético tremendo, temperaturas muy elevadas, enormes turbulencias en el medio interestelar, una densidad estelar muy extrema y una radiación ultravioleta importante, este exponente puede pasar a un valor diferente, como el valor de  $-1.8$  encontrado observacionalmente para el cúmulo de Arches (Hosek et al. 2019), lo que puede indicar que en este entorno se forman relativamente más estrellas masivas que en la vecindad solar.

Otra característica notable que presentan es su alta fracción de multiplicidad, es decir, suelen formar sistemas múltiples (alrededor del 91% de acuerdo con Sana et al. 2014), lo que debe también tenerse en cuenta al analizar su evolución y en el extremo final de la función inicial de masa.

Para estudiarlas, el centro Galáctico es un lugar excepcional por ser el único núcleo galáctico y el entorno de condiciones físicas más extremas que podemos examinar a escalas de milipársecs. Así pues, considerando además que las nubes moleculares en las que se forman se encuentran a distancias mayores a 1 Kpc de nosotros, para estudiar las estrellas masivas necesitaremos instrumentos con la mayor sensibilidad y la mejor resolución posibles.

El objetivo de esta tesis es el estudio de las estrellas masivas pertenecientes a dos de los cúmulos más emblemáticos del centro Galáctico, los cúmulos de Arches y Quintuplet, ambos situados a unos 30 pársecs en proyección de Sagittarius A\*, el agujero negro central de la Vía Láctea, utilizando técnicas de muy alta resolución angular radio interferométricas. Estas técnicas nos permiten la observación de objetos lejanos separados por una distancia angular muy pequeña, sintetizando una apertura equivalente a la distancia de separación de pares de antenas, apertura que no sería posible conseguir con un único radio telescopio.

Debido a que la extinción interestelar en esta región es muy elevada, los estudios observacionales de estos dos cúmulos se han visto limitados fundamentalmente a observaciones en el infrarrojo cercano, con espectroscopía y fotometría, por ser el rango óptico prácticamente inaccesible y estar el infrarrojo medio limitado por la resolución angular y/o la sensibilidad de los instrumentos en un enclave muy poblado de estrellas. Dada la baja estadística de observaciones en radio de los vientos ionizados de las estrellas masivas y la existencia de ellas en los cúmulos de Arches y Quintuplet, este trabajo es un nuevo paso hacia la comprensión de este tipo de estrellas y de los cúmulos que las contienen.

Todos los estudios que en la tesis se presentan se han realizado gracias a la utilización del radio interferómetro *Karl G. Jansky Very Large Array* (JVLA) operado por el *National Radio Astronomy Observatory* (NRAO). En este trabajo se ha obtenido: a) un nuevo censo, en ambos cúmulos, del número de estrellas masivas observadas en longitudes de onda de radio centimétricas, b) los flujos y posiciones de las mismas, c) las tasas de pérdida de masa estimadas, d) una valoración de su posible multiplicidad en base al índice espectral calculado, e) una evaluación de la variabilidad y, finalmente, f) una estimación, entre unos ciertos límites, de la edad y/o masa de los cúmulos, así como de la función inicial de masa en base, precisamente, al número de radiofuentes detectadas.

Tesis disponible desde: [https://www.iaa.csic.es/sites/default/files/thesis/tesis\\_iaa\\_2021\\_gallegocalvente\\_aurelia\\_teresa.pdf](https://www.iaa.csic.es/sites/default/files/thesis/tesis_iaa_2021_gallegocalvente_aurelia_teresa.pdf)

# Modelización y observaciones de outflows relativistas en sistemas binarios de alta energía

Autor: Edgar Molina Lumbreras  
(emolina@fqa.ub.edu)

Tesis doctoral dirigida por: Valentí Bosch-Ramon y Marc Ribó

Centro: Universidad de Barcelona

Fecha de lectura: 29 de septiembre de 2021

Algunos sistemas binarios formados por un objeto compacto, que puede ser una estrella de neutrones o un agujero negro, y una estrella compañera típicamente no degenerada se han observado emitiendo en un amplio rango de frecuencias, desde radio hasta rayos gamma. Estos sistemas normalmente se clasifican como binarias de rayos X o de rayos gamma en función de la frecuencia a la cual su emisión es máxima. Al contrario que en las estrellas convencionales, una gran parte de esta emisión no puede ser explicada mediante procesos térmicos y por tanto es necesario que se den mecanismos no térmicos de emisión de radiación. Las interacciones entre la estrella y el objeto compacto pueden resultar en el lanzamiento de *outflows* de plasma originados alrededor del objeto compacto. Estos *outflows* pueden adquirir velocidades próximas a la de la luz y pueden acelerar partículas cargadas hasta energías relativistas. Parte de la emisión no térmica que se observa en las binarias de rayos X y gamma proviene precisamente del enfriamiento radiativo no térmico de estas partículas. Además, cuando la estrella compañera es muy masiva, esta genera un fuerte viento estelar que interactúa con los *outflows* y les afecta tanto en su dinámica como en su emisión de radiación.

El principal objetivo de esta tesis desde el punto de vista teórico es el estudio de las interacciones entre los *outflows* de binarias de rayos X y gamma y el viento estelar de una estrella compañera masiva. Para esto hemos desarrollado una serie de modelos semianalíticos que dan una visión completa de estas interacciones en diferentes tipos de escenarios. En ellos, se adopta una prescripción simplificada de la trayectoria que siguen los *outflows* para que los cálculos puedan realizarse en ordenadores comunes. La evolución de las partículas no térmicas a lo largo de esta trayectoria se calcula teniendo en cuenta que se enfrían mediante diferentes procesos no térmicos, como la expansión adiabática o las pérdidas por sincrotrón y Compton inverso. Con tal de obtener la emisión detectada por el observador, la emisión intrínseca de los *outflows* es corregida por el efecto del beaming relativista y por procesos de absorción mediados por los campos estelares de fotones e iones.

Los resultados de la modelización teórica incluyen distribuciones espectrales de energía y curvas de luz directamente comparables con los datos observacionales. También se obtienen mapas de radio para la emisión a gran escala de los *outflows*. Estos últimos permiten visualizar directamente el efecto diná-

mico del viento estelar en la trayectoria de los *outflows*, que adquieren forma de hélice o espiral. Esta trayectoria da lugar a asimetrías en las curvas de luz a diferentes rangos de energía, así como a cambios en las distribuciones espectrales de energía debidos principalmente a variaciones en procesos dependientes del ángulo entre el *outflow* y la estrella o el observador.

En su parte observacional, esta tesis se focaliza en la emisión potencial de rayos gamma de muy alta energía (por encima de 100 GeV) de la binaria de rayos X MAXI J1820+070, observada con los telescopios MAGIC. El análisis de las observaciones se realiza a través de un software personalizado de MAGIC, que permite reconstruir la energía y dirección de un rayo gamma a través de la luz Cherenkov emitida por la cascada electromagnética que el rayo gamma genera al entrar en la atmósfera terrestre. Con tal de tener una visión más global de la fuente estudiada, el análisis de muy altas energías se contextualiza con datos multifrecuencia de radio a rayos gamma de alta energía, por encima de los 100 MeV.

Los resultados observacionales consisten en un estudio multifrecuencia de la fuente MAXI J1820+070 en forma de curvas de luz y distribuciones espectrales de energía que utilizan datos de diferentes telescopios a frecuencias radio, ópticas, de rayos X y de rayos gamma. La fuente no se detecta en rayos gamma por encima de 100 MeV, y solo se pueden obtener límites superiores del flujo a estas energías. Sin embargo, estos límites, junto con los flujos en otras frecuencias, permiten acotar significativamente las propiedades de un emisor potencial de rayos gamma en MAXI J1820+070, principalmente su tamaño y localización.

En conclusión, esta tesis profundiza en el conocimiento de las interacciones entre el viento estelar y los *outflows* de sistemas binarios de altas energías. Se muestra que estas interacciones deben tenerse en cuenta con tal de caracterizar el subconjunto de estos sistemas con una estrella masiva, en los cuales el viento estelar es potente. En esta tesis también se muestra que las observaciones de sistemas binarios en rayos gamma de altas y muy altas energías permite limitar de manera importante las propiedades de los *outflows*, incluso cuando las fuentes no son detectadas y solo se pueden obtener límites superiores en los flujos.

Tesis disponible en: <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/180843>