

# TESIS DOCTORALES

## Corrientes Estelares de Marea en el Universo Local

Autoría: Juan E. Miró Carretero

Tesis doctoral dirigida por: David Martínez Delgado y María de los Ángeles Gómez Flechoso

Centro: Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura: 21 de junio de 2024

De acuerdo con el marco establecido para la evolución de las galaxias, estas crecen mediante fusiones con otras galaxias. Las corrientes estelares de marea tienen su origen en la interacción entre una galaxia central y un sistema de menor masa, tal como una galaxia satélite o un cúmulo globular, llegando a producirse lo que se conoce como una fusión menor. El modelo cosmológico  $\Lambda$ CDM predice que los halos de las galaxias masivas son ricos en restos de tales fusiones.

En el Grupo Local, se han identificado muchas subestructuras difusas y establecido su conexión con la evolución de las galaxias. Sin embargo, el Grupo Local no constituye una muestra estadísticamente significativa de corrientes estelares de marea. Por lo tanto, se requiere el análisis de una muestra mayor, más allá del Grupo Local, para poder estimar la frecuencia y características de esas corrientes y poder verificar si estas propiedades están de acuerdo con las predicciones del modelo  $\Lambda$ CDM.

Esta tesis constituye la primera búsqueda sistemática de corrientes estelares de marea en los halos de galaxias del Universo local. Se basa en imágenes profundas obtenidas de la última generación de cartografiados fotométricos de gran escala, tales como DESI Legacy Surveys y el Dark Energy Survey (DES) que llegan a un límite de brillo superficial de 29 mag arcsec $^{-2}$  en la banda g.

La búsqueda de corrientes de marea llevada a cabo en esta tesis ha revelado más de setenta corrientes de marea a una distancia de hasta 100 Mpc que no habían sido identificadas anteriormente en la literatura. Aplicando un análisis estadístico,

se obtiene una frecuencia de detección de  $9.1\% \pm 1.1\%$  para el límite de brillo superficial de la muestra DES, de acuerdo con estudios anteriores. En entre 5% y 14% de las corrientes de marea detectadas se han identificado posibles progenitores, dependiendo del nivel de confianza.

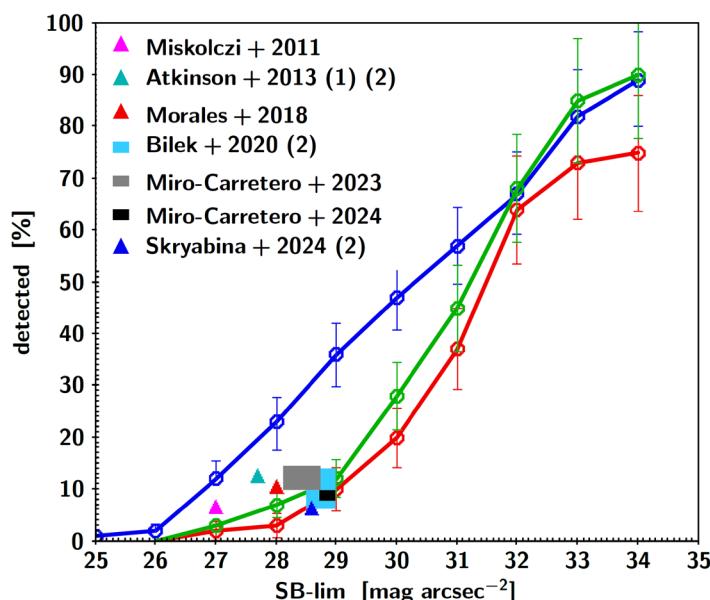
Un resultado de la tesis ha sido un catálogo de corrientes estelares de marea creado a partir de los resultados del análisis de las corrientes de marea detectadas incluyendo morfología y fotometría. Si se juntan los resultados del trabajo previo contribuido por el autor, la población del catálogo llega a más de cien. Este catálogo constituye un primer paso de cara a un catálogo más considerable en el marco del *Stellar Streams Legacy Survey* (SSLS), que incluirá otros cartografiados de DESI así como observaciones de la misión *Euclid* de ESA.

En este trabajo se presenta una comparación cuantitativa entre la abundancia y características de las corrientes estelares de marea detectadas en el Universo Local en la muestra observational de DES con las predicciones de simulaciones cosmológicas basadas en  $\Lambda$ CDM. Para esto se han transformado los resultados de simulaciones cosmológicas de *Copernicus Complexio*, TNG50 y Auriga en imágenes mock de halos cercanos en busca de corrientes de marea.

La frecuencia y fotometría de las corrientes de marea detectadas en las observaciones concuerdan bien en general con los hallazgos en las imágenes mock, mientras que la morfología es algo diferente entre la observación y las simulaciones y entre las simulaciones entre sí.

Variando el ruido de fondo de las imágenes sintéticas para emular niveles de brillo superficial diferentes, se obtienen estimaciones de la detectabilidad de corrientes de marea hasta un nivel de 35 mag arcsec $^{-2}$ . Las simulaciones cosmológicas predicen que para un límite de brillo superficial de 32 mag arcsec $^{-2}$  se obtendría una tasa de detección de corrientes de marea de casi 70%  $\pm 10\%$ .

El trabajo llevado a cabo en esta tesis se continuará mediante la búsqueda de corrientes de marea en con imágenes profundas de otros cartografiados, extendiendo las simulaciones a otros tipos de materia oscura y mejorando la metodología de detección.



Tasa de detección de corrientes estelares de marea: porcentaje de galaxias en las que se detecta por lo menos una corriente de marea en función del brillo superficial límite de la imagen. Las líneas continuas representan los resultados de las simulaciones de TNG50 (rojo), COCO (azul) y Auriga (verde), con las barras de error indicando el intervalo de confianza de Poisson. La figura muestra también los resultados de observaciones de corrientes de marea en la literatura. (1) El cálculo del brillo superficial límite se ha hecho siguiendo un método diferente al usado en esta tesis; (2) La tasa de detección corresponde a estructuras de bajo brillo superficial, incluyendo corrientes de marea. Para la muestra (símbolo cuadrado en negro) las dimensiones x,y indican la dispersión en brillo superficial límite de la muestra y la incertidumbre en la tasa de detección de acuerdo con la distribución binomial, respectivamente (Miró-Carretero et al. 2024).

# Los efectos de la rotación y la metalicidad sobre la merma de litio en estrellas de tipo solar

Autoría: Diego Cuenda Muñoz

Tesis doctoral dirigida por: David Barrado

Navascués

Centro: Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura: 2 de abril de 2025

Puesto que en la base de la zona convectiva de estrellas G y K se destruye litio gradualmente, la abundancia superficial de este elemento se utiliza como indicador de la edad para estos tipos espectrales. Sin embargo, la abundancia de litio no solo depende de la edad, sino que la metalicidad, la actividad y la rotación de la estrella también juegan un papel importante. Caracterizar el efecto que tiene cada uno de estos factores en cada etapa de la evolución estelar resulta enormemente complejo. No obstante, los miembros G y K de cúmulos abiertos constituyen objetos de estudio perfectos para este tipo de análisis, dado que todos ellos comparten la misma edad y metalicidad.

En este trabajo analizamos la influencia de la rotación y la metalicidad sobre la merma de litio en miembros G y K del cúmulo abierto M35, cuya edad es similar a la de las Pléyades. Para ello, partimos de una muestra de 165 estrellas observadas con el espectrógrafo WIYN/Hydra que fue incrementada gracias a estudios previos llevados a cabo con el mismo instrumento. La muestra resultante incluye 396 estrellas, de entre las cuales se identificó a 251 miembros de M35 en base a su posición en diagramas color-magnitud y a su movimiento propio. A partir de los espectros de los 110 miembros añadidos por nosotros a la muestra existente, medimos abundancias de litio y hierro para esas estrellas. Además, obtuvimos períodos de rotación para 197 miembros de M35 a partir de curvas de luz de Zwicky Transient Facility y de estudios previos. Gracias a estos datos confirmamos que los rotadores rápidos de tipo G y K son ricos en litio en comparación con rotadores más lentos de temperatura efectiva similar. Por otro lado, a pesar de que nosotros calculamos una metalicidad promedio para M35 de  $[Fe/H] = -0.26 \pm 0.09$ , su distribución de litio es similar a la observada en M34 y las Pléyades, cúmulos abiertos de metalicidades solares y edades ligeramente distintas a la de M35. Así pues, concluimos que una diferencia de 0.2–0.3 dex en metalicidad no tiene efectos observables en las distribuciones de litio de cúmulos entre 100 y 250 millones de años.

Este trabajo también aborda la influencia de estos factores sobre la merma de litio en miembros de dos cúmulos abiertos de 600 millones de años: Coma Berenices (Coma) y El Pesebre (M44). Para ello, partimos de muestras de miembros G y K de cada cúmulo tomadas de publicaciones anteriores. A continuación, medimos anchuras equivalentes de litio a partir de espectros de alta resolución tomados por nosotros o recuperados de archivos de diversos telescopios. Además, incrementamos nuestras muestras iniciales gracias a estudios anteriores sobre abundancia de litio en estos cúmulos, de modo que nuestras muestras finales incluyen 55 miembros de M44 y 37 miembros de Coma. Dado que Coma ha sido observado por el satélite TESS en varios ciclos, obtuvimos períodos de rotación para miembros de este cúmulo a partir de curvas de luz tomadas por esa misión. Asimismo, también tuvimos en cuenta períodos de rotación publicados en estudios fotométricos previos,

tanto en el caso de Coma como en el de M44. Al contrario de lo observado en cúmulos más jóvenes, en estas muestras solo se observó exceso de litio en una binaria espectroscópica en cada cúmulo, de donde concluimos que la dispersión en litio observada en el rango de las estrellas K es debida a binarias de corto periodo orbital y rápida rotación, mientras que la dispersión en el rango de las estrellas G es despreciable. Al comparar la distribución de litio en Coma con las que presentan M44 y las Híades, cúmulos con metalicidades más altas y edades similares, se observa una sutil tendencia hacia anchuras equivalentes de litio mayores para miembros G de Coma, probablemente debido a la menor metalicidad de este último.

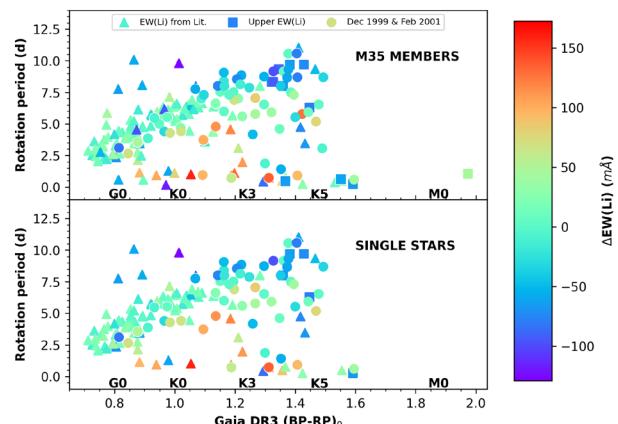


Diagrama que muestra periodo de rotación frente a color de la estrella en el que se han incluido todos los miembros de M35 que componen nuestra muestra (panel superior). Los círculos representan estrellas cuyas anchuras equivalentes de litio se han medido directamente a partir de sus espectros, mientras que los triángulos representan estrellas cuyas anchuras equivalentes de litio se han tomado de publicaciones previas. Los cuadrados representan miembros de M35 para los que únicamente pudimos estimar cotas superiores a partir de sus espectros. El color de los símbolos hace referencia a la desviación en anchura equivalente de litio respecto de un polinomio de tercer grado. En el panel inferior se han excluido las estrellas binarias identificadas en la muestra.

# Observatorio Virtual y aprendizaje automático para el estudio de objetos de baja masa en cartografiados espectroscópicos y fotométricos

Autoría: Pedro Mas Buitrago

(pedro.masb@gmail.com)

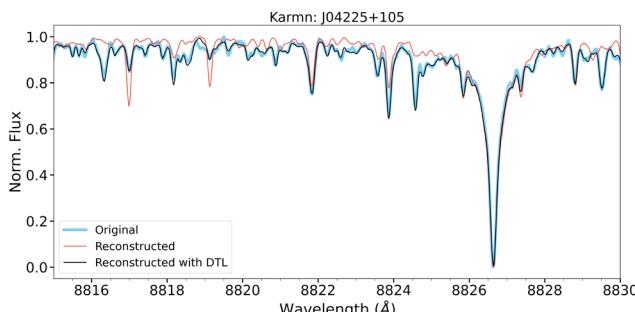
Tesis doctoral dirigida por: Enrique Solano Márquez y Ana González Marcos

Centro: Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura: 19 de junio de 2025

Esta tesis doctoral profundiza en el descubrimiento y la caracterización de objetos de baja masa desde una perspectiva basada en datos, proporcionando un rico catálogo de candidatas a enanas ultrafrías y una metodología de aprendizaje profundo para la estimación de parámetros estelares en enanas M que esperamos que sea de gran valor para la comunidad astronómica. En los últimos años, la astronomía está experimentando un cambio de paradigma impulsado por un crecimiento exponencial de los datos observacionales, con estudios de nueva generación que han producido grandes cantidades de información que han llevado al límite los métodos tradicionales de análisis de datos. Abordamos este reto explorando la aplicación de técnicas de aprendizaje automático y profundo, en combinación con tecnologías del Observatorio Virtual, para el desarrollo de metodologías que permitan avanzar en nuestra comprensión de las enanas M y las enanas ultrafrías en los próximos años. La tesis se divide en dos grandes líneas de trabajo:

Consolidamos un enfoque de aprendizaje profundo basado en redes neuronales autoencoder para determinar los parámetros atmosféricos estelares de enanas M a partir de espectros de alta resolución. Utilizando esta metodología, proporcionamos nuevas estimaciones de la temperatura efectiva, la gravedad superficial, la metalicidad y la velocidad de rotación proyectada de 286 enanas M observadas por CARMENES, mitigando las desviaciones en trabajos anteriores atribuidas a las diferencias entre los datos sintéticos y los observados. Dado que en el proceso de aprendizaje por transferencia no se requieren otros datos que los espectros observados, nuestra metodología demuestra ser muy flexible y representa un importante paso adelante para salvar la brecha sintética en la estimación de los parámetros estelares a partir de espectros sintéticos. Lo demostramos aún más al adaptar con éxito el procedimiento al dominio de baja resolución para estimar la temperatura efectiva de enanas ultrafrías utilizando espectros del infrarrojo cercano de la librería SpeX Prism.



En la otra línea de trabajo, combinando fotometría multifiltro de varias misiones y datos astrométricos, consolidamos una metodología de Observatorio Virtual para identificar de manera eficiente candidatas a enanas ultra frías en estudios de campo amplio y, posteriormente, caracterizarlas. Mediante este enfoque, proporcionamos un catálogo de enanas ultrafrías que abarca toda la cobertura del cielo de la segunda publicación de datos de J-PLUS, lo que aumentó el número de enanas ultrafrías registradas en esta región en aproximadamente un 135%. Demostramos cómo un enfoque de aprendizaje automático podría acelerar este proceso, lo que supone un logro importante teniendo en cuenta la aplicación de esta metodología a estudios más amplios y profundos, como J-PAS y Euclid. En este sentido, el trabajo futuro podría centrarse en mitigar las principales limitaciones de la metodología desarrollada, que se basa en una combinación de análisis de componentes principales y máquinas de vectores de soporte, concretamente el número significativo de falsos positivos obtenidos antes de la determinación de la temperatura efectiva.

Dentro de esta línea, demostramos también el potencial de los estudios fotométricos multifiltro para detectar sistemáticamente eventos de llamarada en enanas M. Combinando las capacidades del Observatorio Virtual para consultar grandes cantidades de datos y un algoritmo de detección flexible desarrollado para este fin, logramos analizar millones de distribuciones espectrales de energía y obtener una muestra de enanas M con erupciones. Confirmamos y estudiamos la naturaleza eruptiva de estos objetos utilizando espectros de baja resolución recopilados con NOT/ALFOSC y GTC/OSIRIS y datos fotométricos de alta cadencia de TESS. Este procedimiento, que puede utilizarse fácilmente en otros estudios fotométricos multifiltro, permitió detectar episodios de fuerte emisión de las líneas Ca II H y K, que no suelen tenerse en cuenta en el estudio de las erupciones en grandes muestras de enanas M y que pueden tener importantes implicaciones para los estudios sobre el clima espacial y la habitabilidad de los exoplanetas.

Las metodologías desarrolladas en esta tesis abren varias vías prometedoras para futuros trabajos. En este sentido, los esfuerzos futuros deberían centrarse en ampliar estos enfoques e integrarlos en el flujo de trabajo de las misiones astronómicas de próxima generación, como J-PAS, Euclid o LSST, que aumentarán drásticamente la cantidad de datos disponibles. Dado que los procesos de aprendizaje automático desempeñarán un papel crucial en la gestión de los vastos conjuntos de datos producidos por estas misiones, las técnicas desarrolladas en esta tesis pueden adaptarse para automatizar el descubrimiento y la caracterización de objetos estelares y subestelares de baja masa. Los resultados obtenidos refuerzan el papel cada vez más importante del aprendizaje automático en la astronomía, destacando su potencial transformador para manejar grandes conjuntos de datos astronómicos, y abogan por enfoques basados en datos que combinen las tecnologías del Observatorio Virtual con técnicas de aprendizaje automático y profundo como el camino a seguir para el futuro de la astronomía observational.

Tesis disponible en: <https://pmb-research.vercel.app/thesis/>

Espectro original (azul) frente a espectro reconstruido por CARMENES para LSPM J0422+1031 (Karmn J04225+105, M3.5 V). La figura solo muestra una sección del espectro para una mejor visibilidad, con el único propósito de enfatizar cómo la reconstrucción tras el ajuste fino (negro) captura características espectrales mucho más detalladas que la reconstrucción con el entrenamiento inicial (rojo).

# Sextans A, una piedra Rosetta para la formación y evolución de estrellas masivas a metalicidad extremadamente baja

Autoría: Marta Lorenzo González

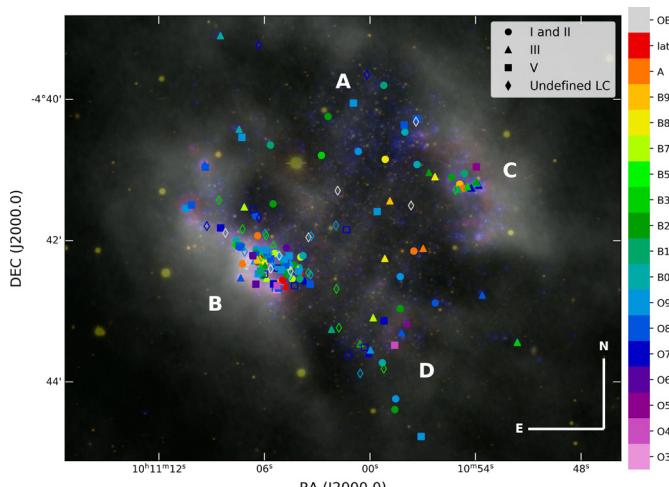
Tesis doctoral dirigida por: Miriam García García y Francisco Najarro de la Parra

Centro: Centro de Astrobiología, CSIC-INTA

Fecha de lectura: 3 de julio de 2025

El reciente lanzamiento del telescopio espacial James Webb está redefiniendo nuestra comprensión del Universo primitivo. Este telescopio detecta ya rutinariamente galaxias de la época de la reionización ( $z = 6-13$ ), un período en el que el Universo en su conjunto era extremadamente pobre en metales ( $XMP \leq 0.10 Z_{\odot}$ ). Para interpretar estas observaciones, es fundamental comprender la física y la evolución de las estrellas masivas XMP. Estos objetos dominan la luz integrada en el rango ultravioleta-óptico de las galaxias tempranas, determinan su evolución dinámica y química, e ionizan su gas nebuloso. Sus caminos evolutivos deben integrarse en los modelos de síntesis de poblaciones para convertir la luz integrada de las galaxias tempranas en propiedades físicas. Sin embargo, los modelos de evolución estelar solo han sido validados con muestras observacionales significativas hasta la metalicidad de la Pequeña Nube de Magallanes (SMC,  $0.20 Z_{\odot}$ ) y no están constreñidos a metalicidades extremadamente bajas.

Nuestro Grupo Local y sus alrededores contienen galaxias XMP con poblaciones estelares resueltas, ofreciendo una oportunidad única para caracterizar las propiedades de las estrellas masivas XMP y restringir sus trayectorias evolutivas. Sin embargo, estas galaxias se encuentran en los límites del Grupo Local ( $\geq 1$  Mpc), lo que dificulta considerablemente su estudio espectroscópico. Antes de esta tesis, no existían esquemas de clasificación específicos para metalicidades extremadamente bajas, ni calibraciones teóricas de parámetros estelares o colores. Además, solo se habían descubierto 23 estrellas OB XMP, de las cuales solo cinco tenían calidadpectral suficiente para determinar sus propiedades físicas. Esta tesis busca abordar tanto la escasez de observaciones como la falta de guías en el estudio de las estrellas masivas XMP.



En primer lugar, construimos referencias para guiar futuros estudios de estrellas OB XMP. El eje central de este esfuerzo fue adaptar los esquemas de clasificación existentes de la Vía Láctea y la SMC a metalicidades extremadamente bajas. Clasificar una extensa red de modelos FASTWIND con nuestros criterios nos permitió producir espectros estándar sintéticos que facilitan la clasificación espectral, identificar nuevos diagnósticos en rangos espectrales alternativos (3000-4050 Å y 4650-9000 Å) cubiertos por instrumentos actuales y futuros, y construir las primeras calibraciones de parámetros estelares y colores para estrellas OB con  $0.10 Z_{\odot}$ .

Posteriormente, exploramos espectroscópicamente la población estelar masiva de la galaxia Sextans A, cuya metalicidad de  $0.10 Z_{\odot}$  la convertía, en ese momento, en la única galaxia del Grupo Local con un contenido confirmado de oxígeno y hierro inferior al de la SMC. Mediante cinco campañas de observación en el Gran Telescopio Canarias, obtuvimos una colección espectroscópica de más de 150 estrellas OB, el censo más extenso de estrellas masivas jamás construido a metalicidades sub-SMC.

Este catálogo reveló estrellas masivas aisladas en zonas con bajo contenido en gas, una extinción interna significativa y no uniforme en la galaxia, y candidatos a experimentar caminos evolutivos exóticos: evolución químicamente homogénea y estrellas stripped.

Por último, determinamos los parámetros estelares de 41 estrellas O de nuestro catálogo, el primer análisis de una muestra extensa de estrellas O con  $0.10 Z_{\odot}$ . Este análisis permitió extender la escala de temperatura efectiva para estrellas O XMP en las tres principales clases de luminosidad y proporcionó nuevas perspectivas sobre el origen de las estrellas aisladas en Sextans A. Por último, no se confirmaron los candidatos a evolución químicamente homogénea detectados en nuestro trabajo anterior, ni se encontraron nuevos, ni tampoco se detectaron estrellas muy masivas, objetos en ambos casos para los que se espera mayor incidencia conforme disminuye la metalicidad.

En esta tesis se ha llevado al límite las capacidades instrumentales actuales para avanzar en nuestra comprensión de las estrellas OB XMP. Las herramientas y resultados obtenidos son pasos fundamentales hacia una caracterización completa de la física y evolución de las estrellas masivas XMP, contribuyendo en última instancia a nuestra comprensión de las condiciones y procesos que dieron forma al Universo primitivo.

Tesis disponible en: <https://auditore.cab.inta-csic.es/masivas-torrejon/team-phd-theses/>

Imagen RGB de la galaxia Sextans A con  $0.10 Z_{\odot}$ , donde se identifican las regiones que albergan formación estelar (A, B, C y D) y se destacan las estrellas del catálogo compuesto en esta tesis, codificándolas por colores según su tipo espectral y con diferentes símbolos según su clase de luminosidad.

# Multiplicidad de sistemas estelares en la vecindad solar, binarias de alta separación y estrellas con planetas

Autoría: Francisco Javier González Payo

Tesis doctoral dirigida por: José A. Caballero y Miriam Cortés Contreras

Centro: Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura: 10 de octubre de 2024

Esta tesis doctoral presenta un estudio exhaustivo sobre la multiplicidad estelar en la vecindad solar ( $d < 10$  pc) y en sistemas múltiples con planetas ( $d < 100$  pc). Estos sistemas se caracterizan a partir de datos del catálogo *Washington Double Star*, *Gaia DR3* y un análisis pormenorizado de la literatura.

Uno de los principales logros es la elaboración de la muestra más completa y homogénea de sistemas múltiples a menos de 10 pc del Sol. Se determinan las fracciones de multiplicidad y de estrellas compañeras con incertidumbres reducidas y con una mayor fiabilidad estadística con respecto a estudios previos gracias a la completitud de la muestra. Además, se realiza un análisis de períodos orbitales desde un día a millones de años que sugiere que la distribución acumulativa log-normal del ajuste podría considerarse una revisión de la ley de Öpik del siglo XXI, lo que resulta un aporte ciertamente novedoso en una muestra tan completa.

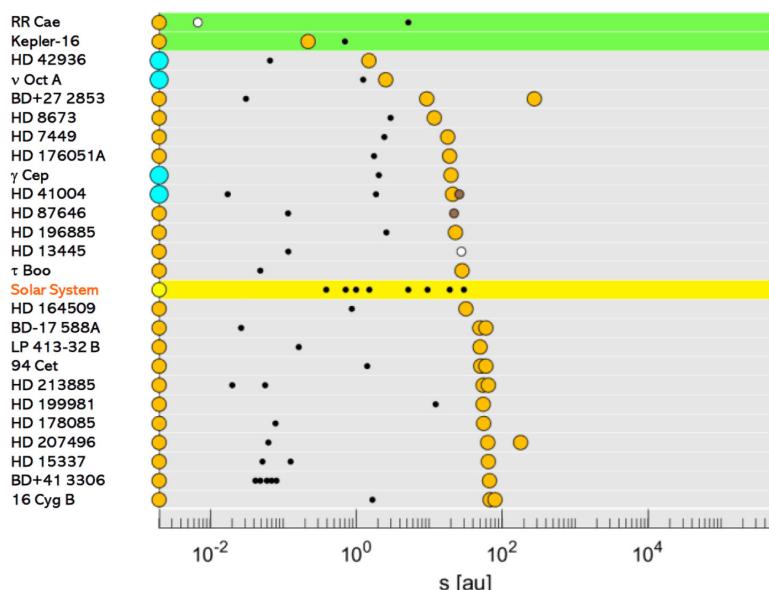
Otro avance clave es el estudio detallado de sistemas binarios amplios ( $p > 1000$  arcsec) utilizando la astrometría de *Gaia DR3*. Este trabajo logra un incremento de más de un orden de magnitud en el tamaño de la muestra y una mejora en la precisión astrométrica. Se identifican nuevos compañeros

astrométricos no catalogados previamente, incluyendo enanas ultrafrías en el límite M-L y una enana blanca caliente, lo que permite diferenciar mejor entre sistemas binarios físicos y miembros de grupos cinemáticos jóvenes no relacionados.

La tesis examina el impacto de la multiplicidad en sistemas exoplanetarios dentro de 100 pc. Se identifican nuevas estrellas compañeras en sistemas planetarios conocidos y se miden separaciones para más de 200 pares estelares, recopilando parámetros clave de 276 exoplanetas. Comparando con una muestra numerosa de estrellas simples con exoplanetas, se identifican tendencias significativas, como una mayor proporción de planetas masivos con períodos orbitales cortos en sistemas múltiples y mayor excentricidad orbital. Casi el 22% de los sistemas exoplanetarios tienen compañeros estelares, con una influencia significativa ( $> 4\sigma$ ) por planetas con altas excentricidades orbitales en sistemas múltiples con pequeños cocientes entre la separación proyectada y el semieje mayor de la órbita planetaria, además de una ligera tendencia ( $> 2\sigma$ ) a que los planetas de alta masa ( $M > 40 M_{\oplus}$ ) en sistemas múltiples orbiten más cerca que en estrellas individuales. Estas tendencias contribuyen al debate sobre la influencia de la multiplicidad en la evolución planetaria.

Finalmente, este trabajo realiza una revisión histórica de las primeras observaciones de sistemas estelares múltiples, analizando los catálogos del astrónomo del siglo XVII Giovanni Battista Hodierna. Se demuestra que Hodierna publicó la primera lista de sistemas múltiples más de un siglo antes de lo que se creía, redefiniendo la historia temprana de la astronomía de estrellas dobles y sistemas estelares múltiples y su relación con los exoplanetas. Gracias a la combinación de datos de *Gaia DR3*, una compilación meticulosa de información previa y un enfoque histórico, se obtienen resultados novedosos y estadísticamente sólidos que tienen importantes implicaciones para los modelos de formación y evolución estelar y planetaria. Esta tesis prepara el camino para los nuevos estudios mejorados que se esperan con *Gaia DR4*.

Tesis disponible en: <https://nextcloud.com.uvigo.es/s/mXM8toRjWariYeQ>



Configuración esquemática de algunos de los sistemas estelares múltiples detectados con exoplanetas. Los círculos naranjas representan estrellas de secuencia principal, los círculos azules son estrellas subgigantes y gigantes, los círculos blancos son enanas blancas, los círculos marrones pequeños representan enanas marrones y los puntos negros son planetas. El fondo verde representa sistemas con planetas circumbinarios y el fondo blanco sistemas con planetas alrededor de ambas estrellas. Los sistemas están ordenados por separación creciente desde la estrella anfitriona del planeta hasta la estrella compañera más cercana. La abcisa representa la separación en escala logarítmica. Adicionalmente se muestra el Sistema Solar en amarillo como comparación.

# Caracterización de la capa límite planetaria de Marte con datos obtenidos por MEDA en el rover Perseverance

Autoría: Asier Munguira Ruiz

Tesis doctoral dirigida por: Agustín Sánchez Lavega y Ricardo Hueso Alonso

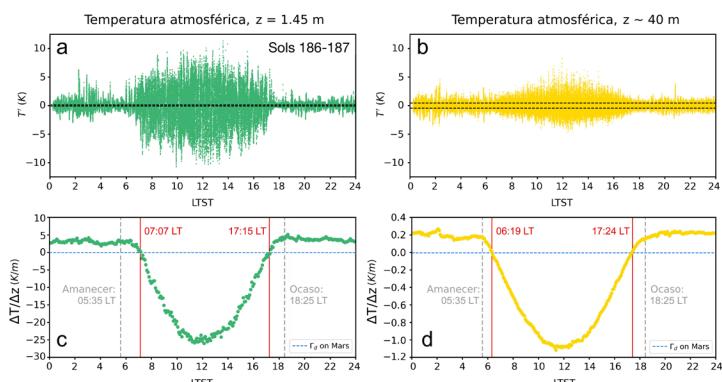
Centro: Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

Fecha de lectura: 17 de julio de 2025

La capa límite planetaria (PBL, por sus siglas en inglés) es la parte más baja de la atmósfera de los cuerpos terrestres, donde se produce un intercambio de calor, momento y especies moleculares entre la superficie y la atmósfera. Los planetas terrestres (y las lunas con atmósferas densas, como Titán) tienen PBLs en las que se manifiestan fenómenos análogos a los que se experimentan en las capas más bajas de la atmósfera terrestre. Sin embargo, Marte es el único planeta extraterrestre del que se dispone de datos suficientes como para llevar a cabo una exploración detallada de su PBL. Comprender los diversos fenómenos de la PBL marciana es de gran importancia, ya que estos fenómenos contribuyen en gran medida a configurar la meteorología y el clima del planeta, con implicaciones para la habitabilidad del planeta y la operación de misiones espaciales de exploración de Marte.

Esta tesis investiga la PBL marciana utilizando datos meteorológicos *in situ* del instrumento *Mars Environmental Dynamics Analyzer* (MEDA) a bordo del rover *Perseverance* de la misión *Mars 2020*, que aterrizó en el cráter Jezero (18,4°N, 77,6°E) el 18 de febrero de 2021. Las medidas de MEDA permiten estudiar las variaciones atmosféricas en escalas de tiempo que van desde unos pocos segundos hasta dos años marcianos. Las variaciones rápidas, relacionadas con la turbulencia local, solo pueden estudiarse con observaciones *in situ*, mientras que las variaciones diurnas y estacionales de las propiedades atmosféricas han sido interpretadas con la ayuda de simulaciones atmosféricas.

MEDA tiene capacidades significativamente mejores que las estaciones meteorológicas de misiones anteriores en la superficie de Marte, lo que permite estudiar los procesos de la capa límite con mayor detalle. Esta tesis se centra principalmente en el análisis de las medidas de MEDA de temperatura superficial y de temperatura atmosférica a tres alturas (hasta unos 40 m).



Esto incluye el estudio de gradientes térmicos y fluctuaciones de temperatura a diferentes niveles, lo que permite caracterizar la turbulencia convectiva diurna y el periodo estable durante la noche (ver figura). La tesis también incluye un análisis exhaustivo de las medidas de viento realizadas por MEDA durante medio año marciano, así como un estudio de oscilaciones atmosféricas nocturnas detectadas en presión y temperatura.

Las variaciones diurnas y anuales de la temperatura atmosférica cerca de la superficie revelan la contribución de fenómenos a escala planetaria, como las mareas térmicas y ondas de largo período, con una evolución estacional que sigue el ciclo de irradiancia solar en Jezero. Además, las variaciones interanuales de la temperatura arrojan luz sobre los cambios meteorológicos locales producidos por las diversas propiedades de los diferentes terrenos explorados por *Perseverance*.

Durante la noche y tras el amanecer, se detectan oscilaciones atmosféricas en los datos de presión (y a veces también en los de temperatura) relacionadas con distintos fenómenos ondulatorios y de turbulencia atmosférica. La caracterización de estas oscilaciones revela ondas de gravedad y ondas solitarias relativamente frecuentes, así como eventos de alta turbulencia potencialmente consistentes con una inestabilidad del tipo Kelvin-Helmholtz con su origen a decenas de metros sobre la superficie.

Los datos de MEDA de temperatura, presión y viento han permitido caracterizar ampliamente los procesos turbulentos que ocurren cerca de la superficie en el cráter Jezero, tanto durante el día como durante la noche. Utilizando las medidas de MEDA, así como simulaciones atmosféricas realizadas con el *Mars Planetary Climate Model* (Mars PCM) y el *Mars Mesoscale Model* (MMM), se han calculado para Jezero los parámetros de escala fundamentales que describen la turbulencia atmosférica. Los modelos Mars PCM y MMM son modelos comunitarios desarrollados en gran parte en el *Laboratoire de Météorologie Dynamique*. Las simulaciones presentadas en esta tesis para contextualizar las observaciones de MEDA y explorar interpretaciones físicas de los fenómenos observados se lanzaron como parte de una estancia de doctorado en la Universidad de Nantes.

La contribución principal de esta tesis ha sido proporcionar un análisis exhaustivo de la temperatura atmosférica medida desde la superficie de Marte. El estudio de las temperaturas cercanas a la superficie es clave para comprender la PBL, respaldar investigaciones atmosféricas que se centran en otras variables meteorológicas (como la humedad relativa), validar los modelos atmosféricos y diseñar futuras misiones a la superficie de Marte.

Tesis disponible en: <https://ehubox.ehu.eus/s/rBX8Zj0MSr28pcC>

Evolución típica de las fluctuaciones de temperatura y los gradientes térmicos verticales durante un día Marciano (o sol) cerca de la superficie en función de la hora local (LTST, por sus siglas en inglés). Fluctuaciones de la temperatura atmosférica,  $T$ , a alturas de 1,45 m (a) y 40 m (b), en los soles 186 y 187 (longitud subsolar  $L_S \approx 90^\circ$ ). Las fluctuaciones de temperatura a cada segundo se obtienen tras sustraer un ajuste polinómico de segundo orden a las temperaturas en ventanas de 30 minutos. Las líneas discontinuas horizontales muestran los niveles de ruido nominales de 0,1 K y 0,45 K para las temperaturas a 1,45 m y 40 m, respectivamente. (c) Gradientes verticales de temperatura entre la superficie y 1,45 m y (d) entre la superficie y 40 m, promediados cada 5 minutos, en los soles 186-194. El gradiente adiabático de temperatura de la atmósfera marciana ( $-4,5 \text{ K km}^{-1}$ ) se representa como una línea azul discontinua. Obsérvese el cambio en la escala del gradiente entre (c) y (d). Las líneas verticales grises en (c) y (d) marcan la salida y puesta de Sol. Las líneas verticales rojas denotan los momentos en los que la estabilidad atmosférica cambia: durante la noche, la atmósfera es estable y la turbulencia se genera por la cizalla del viento, mientras que durante el día la atmósfera es inestable y una parte importante de la turbulencia se genera por convección, dando lugar a fluctuaciones de temperatura de gran amplitud. Ver también Rodríguez-Manfredi et al. (2023, *Nature Geoscience*).

## Fuentes transitorias con LST-1: estudio de novas, supernovas y estallidos de rayos gamma

Autoría: Arnau Aguasca i Cabot

(arnau.aguasca@fqa.ub.edu)

Tesis doctoral dirigida por: Pol Bordas Coma  
y Marc Ribó Gomis

Centro: Universitat de Barcelona

Fecha de lectura: 23 de septiembre de 2025

La rama de la astrofísica que estudia los fenómenos transitorios permite la exploración de fuentes astronómicas que muestran variabilidad temporal que puede extenderse desde unas pocas fracciones de segundo hasta escalas tan largas como años. Estos eventos transitorios pueden dar lugar a una gran variedad de fenómenos observados en todo el espectro electromagnético. La detección de variabilidad en el rango de los rayos gamma, en particular, suele estar relacionada con cambios drásticos en el entorno de la fuente que emite dicha radiación. En casos extremos, estos fenómenos transitorios pueden ser producidos debido a la destrucción parcial o total de la fuente. Durante estos episodios, la fuente puede volverse extremadamente luminosa, llegando a ser una de las más brillantes del cielo, incluso si se encuentra a distancias cosmológicas. A pesar de los avances en este campo de investigación en los últimos años, los mecanismos responsables de la emisión de rayos gamma en fuentes transitorias siguen siendo enigmáticos, con independencia de la naturaleza de la fuente que los produce.

Los rayos gamma en el rango de energías de decenas de GeV hasta cientos de TeV pueden ser detectados desde tierra con los telescopios Cherenkov. Esta tesis se enmarca precisamente en el estudio de fuentes transitorias utilizando el primer prototipo de la nueva generación de telescopios Cherenkov, que formará parte del futuro *Cherenkov Telescope Array Observatory* (CTAO). Los telescopios más grandes del futuro CTAO, los *Large-Sized Telescopes* (LSTs), estarán optimizados para detectar rayos gamma de energías relativamente bajas, alcanzando decenas de GeV. El primero de estos telescopios (LST-1) se encuentra en fase de verificación, aunque paralelamente ya está empezando a ofrecer los primeros resultados científicos. LST-1 se encuentra en el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM), el lugar asignado para tener la matriz de telescopios de CTAO para observar el hemisferio norte (CTAO-N). Esta matriz será completada con otros tres LSTs en el ORM que se encuentran ya en construcción.

Esta tesis se centra en el estudio de fuentes transitorias en el rango de rayos gamma de muy alta energía (VHEs: 100 GeV < E < 100 TeV). Se ha realizado un estudio detallado de las explosiones de novas y supernovas (SNe) y de los estallidos de rayos gamma (en inglés *gamma-ray bursts*, GRBs).

Hemos estudiado la emisión producida en la fuente RS Ophiuchi, la primera explosión de nova jamás detectada en el rango VHEs. Hemos analizado datos obtenidos contemporáneamente con LST-1 y el telescopio *Fermi*-LAT durante este evento. Hemos modelizado su emisión utilizando el espectro de rayos gamma más completo jamás obtenido para esta fuente, incluyendo no solamente las observaciones tomadas con LST-1 y *Fermi*-LAT, sino también datos obtenidos con los telescopios



LST-1 con una estrella fugaz. Crédito: Tomohiro Inada.

Cherenkov MAGIC y H.E.S.S. Nuestro estudio concluye que la emisión de rayos gamma en RS Ophiuchi puede explicarse correctamente en un escenario hadrónico (aceleración de protones). También hemos evaluado las perspectivas para futuras detecciones de novas con CTAO, resaltando las excelentes capacidades de los LSTs para el seguimiento de estas fuentes y poder así restringir los parámetros físicos relevantes en este tipo de eventos.

Hemos estudiado la posible emisión de rayos gamma en dos explosiones de supernova cercanas producidas durante el colapso de una estrella muy masiva, etiquetadas SN 2023ixf y SN 2024bch. Estas supernovas fueron observadas con el LST-1 y los telescopios MAGIC pocas semanas después de su descubrimiento. Aunque ninguna de las dos fuentes ha sido detectada, hemos podido obtener límites superiores a su flujo, enfatizando los puntos fuertes y las limitaciones que las observaciones en este rango pueden ofrecer para la comprensión de los fenómenos físicos que dan lugar a este tipo de explosiones.

Hemos estudiado la emisión de rayos gamma del GRB 221009A, conocido como "*The brightest-of-all-time*" (*The BOAT*) GRB. Las observaciones obtenidas con LST-1 muestran un exceso de rayos gamma con una significación estadística de 4,1 sigmas. Hemos comparado los resultados obtenidos con LST-1 con diversos modelos teóricos que explican de manera consistente los datos multilongitud de onda obtenidos con diferentes telescopios. Nuestros resultados han ayudado a resolver la degeneración existente entre algunos de estos modelos teóricos compatibles con la emisión de banda ancha de este evento.

Los resultados obtenidos para estos tres tipos de fuentes, publicados en cuatro artículos arbitrados, ponen de relieve las excelentes capacidades de los LSTs para el estudio de fuentes de rayos gamma transitorias. Además, estos resultados proporcionan un primer adelanto del potencial del CTAO para estudiar este tipo de eventos.

Tesis disponible en: <http://hdl.handle.net/10803/695723>

# Búsqueda y estudio de estrellas masivas fugitivas en la Vía Láctea e impacto en binarias de altas energías

Autoría: María del Mar Carretero Castrillo

Tesis doctoral dirigida por: Marc Ribó Gomis y Josep M. Paredes Poy

Centro: Universitat de Barcelona

Fecha de lectura: 3 de octubre de 2025

Las estrellas masivas están presentes en numerosos fenómenos astrofísicos. Una fracción significativa de ellas son estrellas fugitivas que presentan altas velocidades con respecto a su entorno. Debido a sus escenarios de formación, las estrellas fugitivas desempeñan un papel relevante en la física de cúmulos estelares y sistemas binarios. Sin embargo, la contribución relativa de los diferentes mecanismos de formación, su papel en la evolución de las binarias masivas y su relación con sistemas binarios que albergan objetos compactos (COs en inglés) no están bien determinados. En particular, algunas de estas binarias con COs pueden ser fuentes de alta energía. Aunque se han realizado algunos estudios en las Nubes de Magallanes, la población de estrellas fugitivas masivas en la Vía Láctea ha sido poco explorada. La tercera publicación de datos (DR3) de la misión *Gaia* de la Agencia Espacial Europea (ESA) ha proporcionado datos astrométricos de precisión sin precedentes, lo que permite obtener distancias y velocidades precisas, fundamentales para identificar estrellas fugitivas en la Galaxia.

El objetivo principal de esta tesis es mejorar la comprensión de la población de estrellas fugitivas masivas en la Vía Láctea. Un objetivo secundario es estudiar su conexión con sistemas binarios de alta energía. Para ello, desarrollamos un método novedoso y autoconsistente para identificar estrellas fugitivas, que evita el uso de umbrales de velocidad, en contraste con trabajos previos. Esto nos permitió detectar tanto estrellas fugitivas como estrellas caminantes entre los catálogos GOSC y BeSS. La caracterización de las fugitivas se llevó a cabo con datos de *Gaia* DR3, complementados con información multilongitud de onda de archivos, observaciones de radio dedicadas y espectroscopía de alta resolución del proyecto IACOB.

Identificamos 106 estrellas de tipo O y 69 de tipo Be fugitivas en la Galaxia, siendo aproximadamente la mitad nuevos descubrimientos. Caracterizamos sus distribuciones espaciales y de velocidad, encontrando mayores velocidades y fracciones de fugitivas entre las estrellas de tipo O, en concordancia con las predicciones de eyecciones dinámicas desde cúmulos. Este trabajo dio lugar a la compilación de dos catálogos de estrellas fugitivas, con estimaciones precisas de distancias y velocidades. Además, estudiamos la interacción de estas estrellas con el medio interestelar (ISM) usando datos de WISE, descubriendo nuevos arcos de choque y burbujas estelares, y derivando densidades del ISM en sus entornos. Las búsquedas de emisión de radio alrededor de estos arcos de choque no resultaron en nuevas detecciones, aunque los resultados obtenidos permitieron modelar la posible naturaleza de su emisión.

Realizamos un estudio observational extenso y sin precedentes de las estrellas fugitivas de tipo O en la Vía Láctea, anali-

zando sus velocidades espaciales y de rotación, así como sus clasificaciones de binariedad, de forma homogénea. Para ello combinamos nuestros catálogos de fugitivas con datos espectroscópicos de IACOB. Encontramos que la mayoría de las estrellas fugitivas parecen ser estrellas aisladas, confirmando las expectativas teóricas, y que la mayoría son rotadoras lentas. Las tendencias observadas en los parámetros analizados permitieron identificar posibles huellas de los mecanismos de eyección en la población galáctica de estrellas fugitivas, proporcionando valiosas restricciones a modelos de eyección de fugitivas.

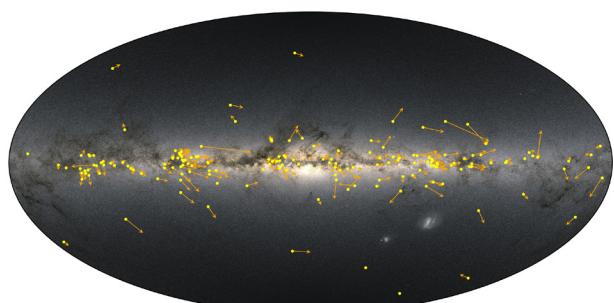
Identificamos también una muestra interesante de sistemas binarios fugitivos, algunos de los cuales son binarias de rayos X de alta masa (HMXB en inglés) o binarias de rayos gamma. En particular, encontramos una sobreabundancia de fugitivas entre las binarias de rayos gamma conocidas. Dentro de la muestra de estrellas fugitivas de tipo O identificamos varios sistemas binarios espectroscópicos de una sola línea, de los cuales la mitad son HMXBs o candidatos a albergar agujeros negros. Estos últimos presentan propiedades similares a las HMXBs dentro del espacio de parámetros analizado, constituyendo un conjunto prometedor de sistemas que podrían albergar COs.

También buscamos emisión gamma de muy alta energía (VHE en inglés) del sistema HMXB Cygnus X-3 con los Telescopios MAGIC. Analizamos el conjunto de datos más amplio hasta la fecha y no encontramos emisión significativa, pero obtuvimos las restricciones más estrictas hasta ahora sobre el flujo VHE, que podrían aportar información sobre las propiedades del sistema.

En conclusión, esta tesis ha profundizado en el conocimiento de las estrellas fugitivas masivas de nuestra Galaxia. Proporciona un número significativo de fugitivas descubiertas, nuevas restricciones empíricas sobre los mecanismos de formación de fugitivas y una muestra de binarias fugitivas que podrían albergar COs, algunas de las cuales podrían mostrar emisión de alta energía. Dado que las estrellas fugitivas masivas son cruciales en numerosos fenómenos astrofísicos, los catálogos compilados en esta tesis se han publicado en acceso abierto para ampliar el impacto científico de este trabajo.

Catálogos ampliados de estrellas masivas y *Gaia* DR4 permitirán un estudio más completo de las estrellas fugitivas, facilitando el descubrimiento de nuevas binarias de alta energía mediante estudios multilongitud de onda y refinando modelos de evolución estelar en sistemas binarios y, en última instancia, la comprensión de la interacción en binarias masivas.

Tesis disponible en: <https://www.tdx.cat/handle/10803/695489>



Mapa de la Vía Láctea con las estrellas fugitivas que se han encontrado en esta tesis. Los puntos amarillos marcan las posiciones de las estrellas fugitivas, mientras que las flechas naranjas indican las direcciones hacia las que se están moviendo. El fondo de la imagen es el mapa de la Vía Láctea de *Gaia* DR3 (crédito: ESA/Gaia/DPAC).

## Desentrañando la naturaleza oscura del Universo con lentes gravitacionales

Autoría: José María Palencia Sainz  
 (palencia@ifca.unican.es)

Tesis doctoral dirigida por: José María Diego Rodríguez, y Bradley J. Kavanagh

Centro: Instituto de Física de Cantabria (CSIC-UC)  
 Fecha de lectura: 28 de octubre de 2025

Esta tesis doctoral es un compendio de tres artículos dedicados a explotar el efecto de lente gravitacional para estudiar la naturaleza de la materia oscura (DM). El efecto de lente se detecta a través de su influencia sobre fuentes lejanas situadas detrás de la lente, produciendo cambios en su posición aparente, imágenes múltiples con retardos temporales y deformaciones en tamaño, forma y flujo. La magnitud de estos efectos depende del modelo cosmológico y de la distribución de masa en la lente, sensible a toda la materia y, por tanto, útil para estudiar la DM.

En esta tesis se analiza el fenómeno de la magnificación en dos contextos distintos: las estrellas lejanas altamente magnificadas por cúmulos de galaxias, y la distribución estadística de magnificaciones en imágenes centrales generadas por lentes galácticas.

### Estrellas altamente magnificadas

El efecto conjunto de un cúmulo de galaxias y sus estructuras de pequeña escala, actuando como microlentes, puede producir factores de magnificación de cientos o miles, incrementando notablemente el flujo observado cerca de las curvas críticas tangenciales durante días o semanas.

Estas microlentes proceden en su mayoría de poblaciones estelares viejas, aunque podrían incluir DM compacta, como agujeros negros primordiales o minihalos de axiones. La naturaleza no lineal de la ecuación de lente impide obtener analíticamente la distribución estadística de magnificación, lo que limita su uso para acotar la fracción de DM compacta, y las simulaciones clásicas no permitían explorar adecuadamente estos escenarios.

Para avanzar en este campo, se han realizado simulaciones realistas de microlente en cúmulos de galaxias, con amplio campo de visión y alta resolución, centradas en regiones próximas a curvas críticas tangenciales. Se ha estudiado la relación entre la distribución estadística de magnificación y los parámetros del modelo de lente, así como la masa y la abundancia de microlentes. A partir de estos resultados se ha ajustado la evolución de la distribución de magnificaciones a los parámetros de los macro y micromodelos.

Como resultado, se ha desarrollado la herramienta semianalítica M\_SMiLe, capaz de reproducir la complejidad y la evolución de la magnificación por microlentes en cúmulos de galaxias. Esta herramienta permite obtener de forma rápida y precisa distribuciones estadísticas de magnificación en distintos escenarios, facilitando el estudio de la DM compacta.

La herramienta se ha validado en el arco Warhol, generado por el cúmulo MACS J0416.1-2403. Combinando datos fotométricos de los telescopios espaciales HST y JWST se ha ajustado la SED de la galaxia y se ha estimado su población estelar. Con esta información y modelos de lente actualizados se ha calculado la distribución espacial y el número esperado de eventos para diversas profundidades observacionales. Los resultados se han comparado con los eventos detectados por JWST, evaluando también el efecto de DM compacta y de subhalos sobre el número y la distribución espacial de los eventos.

Los resultados principales son:

- Obtención de una aproximación semianalítica de la probabilidad de magnificación bajo microlente extragaláctica.
- Identificación de dependencias claras con la macroparidad, la magnificación macroscópica y la abundancia de microlentes.
- Caracterización de los efectos de más es menos y del muro de magnificación, útiles para inferir la cantidad de microlentes y estimar la fracción de DM compacta.
- Predicción del número de eventos esperados y detectados en el arco Warhol.
- Estudio del impacto de DM compacta y subhalos sobre la distribución espacial de los eventos.

### Materia oscura difusa

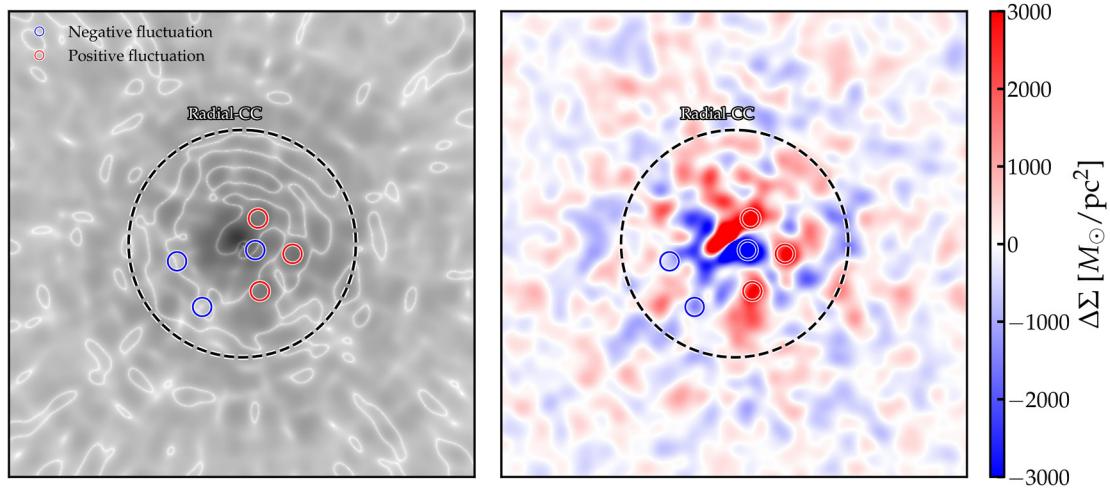
Los axiones son candidatos destacados a DM. En el régimen ultraligero, sus longitudes de onda de de Broglie superan la distancia media entre partículas del halo, generando efectos cuánticos a escalas macroscópicas, y comportándose como una onda que produce fluctuaciones positivas y negativas respecto al modelo CDM. Estas fluctuaciones alteran los observables de lente y se han propuesto para explicar anomalías difíciles de reproducir bajo CDM.

En este trabajo se han generado simulaciones realistas de lentes galácticas bajo FDM, explorando un amplio rango de masas de axión y de halo. El análisis se centra en las variaciones de magnificación de fuentes compactas con imágenes dentro de las curvas críticas radiales, comparando los resultados con modelos equivalentes bajo CDM, con y sin subestructura.

Los resultados muestran que:

- Las fluctuaciones negativas en FDM favorecen regiones de mayor magnificación y facilitan imágenes centrales brillantes.
- Bajo CDM sin subestructura, la probabilidad de alta magnificación decae rápidamente hacia el centro.
- La subestructura en CDM permite alta magnificación solo en regiones muy localizadas.
- Las detecciones de fuentes puntuales altamente magnificadas son significativamente más probables en FDM.

Tesis disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/38117>



Izquierda: Distribución espacial de la magnificación en lentes galácticas bajo FDM. Derecha: fluctuaciones responsables de estas variaciones.