

## Extensión de las relaciones de escala de formación estelar hasta $10^8 M_{\odot}$ a $1 < z < 3$ con HST, GTC y ALMA

Autoría: Rosa María Mérida González

Tesis doctoral dirigida por: Pablo G. Pérez

González y Patricia Sánchez Blázquez

Centro: Universidad Autónoma de Madrid

Fecha de lectura: 21 de junio de 2024

Las galaxias de baja masa representan un componente fundamental, aunque esquivo, del Universo. Son objetos poco luminosos, lo que convierte su estudio en un verdadero desafío, especialmente a altos desplazamientos al rojo.

Mientras que las galaxias brillantes y más masivas muestran historias de formación estelar suaves y constantes, las galaxias poco masivas parecen seguir trayectorias explosivas y estocásticas. Aún no se sabe con certeza si sus propiedades, como la tasa de formación estelar o el contenido de gas, encajan en el amplio marco conceptual derivado del estudio de galaxias más masivas.

Este trabajo de tesis aprovecha datos ópticos profundos de la era preJWST y observaciones milimétricas de regiones observadas en el marco del *Great Observatories Origins Deep Survey* (GOODS; Dickinson et al. 2003, Giavalisco et al. 2004) para explorar dos relaciones de escala de formación estelar. Estudiamos la Secuencia Principal de galaxias con formación estelar ("Main Sequence", MS; Mérida et al. 2023), que relaciona la tasa de formación estelar con la masa estelar, y la Secuencia Principal de Masa Molecular ("Molecular Mass Main Sequence", Mmol-MS; Mérida et al. 2024), que conecta los depósitos de gas molecular con la masa estelar. La principal novedad de este trabajo radica en que logramos ampliar los límites de estas observaciones para explorar el régimen de baja masa ( $\sim 10^8 M_{\odot}$ ) a desplazamientos al rojo entre  $1 < z < 3$  ( $2 < t_{\text{age}} < 6$  Gyr).

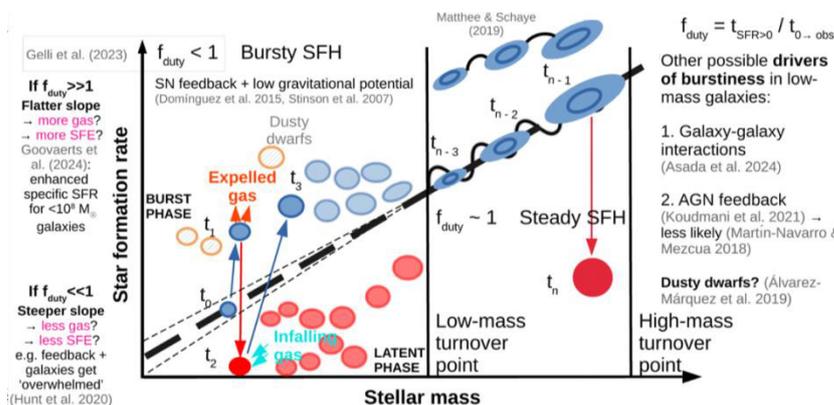
Mediante el apilado ("stacking") de imágenes HST/ACS y GTC/SHARDS (i.e., en el óptico) del campo GOODS-N, descubrimos 34 061 nuevas fuentes no incluidas en catálogos previos, basados en el infrarrojo cercano (NIR). Estas galaxias presentan colores azules, son jóvenes y albergan brotes de formación estelar. Nuestra muestra extiende los límites de masa del catálogo basado en el *Cosmic Assembly Nearinfrared Deep Extragalactic Legacy Survey* (CANDELS; Grogin et al. 2011, Koekoer et al. 2011) en  $\sim 0,6$  dex, revelando una pendiente de la MS a baja masa consistente con estudios previos, aunque con indicios de una mayor inclinación a  $z > 2$ . Esta inclinación podría sugerir una menor eficiencia en la formación estelar y/o un menor contenido de gas en estas fuentes.

Estudiamos el contenido de gas en galaxias poco masivas mediante el "stacking" de emisión de fuentes débiles en el rango milimétrico, utilizando el catálogo de CANDELS en GOODS-S y las observaciones de ALMA en banda 6 de GOODS-ALMA 2.0 (Franco et al. 2018, Gómez-Guijarro et al. 2022). Según nuestro estudio, las extrapolaciones basadas en muestras completas en masa hasta  $10^{10} M_{\odot}$  pueden estar sobreestimando el contenido de gas en objetos menos masivos ( $10^{8-9} M_{\odot}$ ). Como resultado de nuestro análisis, conseguimos aportar los primeros límites superiores para los depósitos de gas a estas masas. Este análisis también incluye fuentes más masivas y débiles en el milimétrico, cuyos reservorios resultan ser compatibles con los valores derivados de muestras completas hasta  $10^{10} M_{\odot}$ . Sin embargo, estos valores son bajos comparados con el contenido de gas obtenido de fuentes catalogadas en ALMA (más rojas y polvorientas que la población media).

Este trabajo no solo subraya la necesidad de ampliar el censo de galaxias poco masivas, sino también la importancia de mejorar las herramientas típicas de análisis, basadas en el estudio de las distribuciones espectrales de energía, para lidiar con objetos poco luminosos.

Tesis disponible en:

<https://drive.google.com/file/d/1YmlTglWoew8dkDuo2b6rWJypgocPLskX/view?usp=sharing>



Esquema del posible escenario que describiría la evolución de las galaxias poco masivas en el marco de la Secuencia Principal. Colores azules indican fases de formación estelar. Colores rojos indican una fase de latencia o transición hacia la quiescencia. Los símbolos sombreados representan formación estelar polvorienta. Mostramos las galaxias de baja masa con tamaños compactos, incluyendo estructuras tipo disco. Se muestra una extrapolación de la Secuencia Principal, con una pendiente cercana a la unidad, representada por una línea gruesa discontinua. Las líneas más finas señalan las opciones de cambio en la pendiente. A la izquierda del gráfico incluimos referencias que apoyarían cada uno de estos cambios. "t" denota diferentes momentos en la evolución. Las líneas verticales resaltan los puntos de cambio de régimen. El "low-mass turnover point" fue derivado en este trabajo de tesis. Entre los dos límites, la formación estelar ocurre de manera suave, con diferentes fases de compactación y agotamiento (Tacchella et al. 2016). Esta no es la única interpretación de la Secuencia Principal y añadimos una referencia a Matthee & Schaye (2019), que estudia un escenario alternativo. Por debajo del "low-mass turnover point", la formación estelar se vuelve explosiva, "bursty". A medida que nos movemos hacia masas más bajas, "f<sub>duty</sub>" (la fracción de tiempo empleada en formar estrellas) disminuye y aumenta el número de galaxias en fase latente. Esta historia de formación estelar puede deberse a la combinación del "feedback" de supernova junto con el bajo potencial gravitatorio de estos sistemas, así como a la incidencia de "mergers" o la presencia de "Active Galactic Nuclei" (AGN).

# Proyecto Lockman-SpReSO. Propiedades ópticas de una muestra de galaxias seleccionadas en el infrarrojo

Autoría: Mauro González Otero  
(mauromarago@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Jordi Cepa y  
Carmen P. Padilla Torres

Centro: Instituto de Astrofísica Canarias y  
Universidad de La Laguna

Fecha de lectura: 28 de junio de 2024

Históricamente, los mapas celestes han sido la principal fuente de datos astronómicos, utilizados para explorar y comprender el Universo en profundidad. Este trabajo está dedicado al estudio de uno de ellos: el proyecto Lockman-SpReSO. Este es un seguimiento espectroscópico óptico cartográfico de fuentes seleccionadas por su emisión infrarroja, a partir de observaciones previas con el *Telescopio Espacial Herschel*. Las observaciones del cartografiado se llevaron a cabo utilizando el instrumento OSIRIS instalado en el *Gran Telescopio Canarias*.

La muestra del cartografiado la componen 956 fuentes infrarrojas y 188 objetos adicionales de interés, todas ellas situadas en el campo extragaláctico de *Lockman Hole*. Hasta la fecha, el proyecto Lockman-SpReSO es el estudio más exhaustivo y estadísticamente significativo sobre contrapartidas ópticas de fuente infrarrojas, lo que lo convierte en un proyecto de alto interés científico.

El trabajo de investigación desarrollado en esta tesis se ha centrado en determinar las propiedades ópticas de las galaxias infrarrojas. Para ello se han obtenido medidas como la tasa de formación estelar (SFR, por sus siglas en inglés), la metalicidad del gas, la extinción del polvo interestelar, la masa estelar ( $M^*$ ) y la luminosidad total infrarroja ( $L_{\text{TIR}}$ ). Estas propiedades se han comparado con las obtenidas para muestras de galaxias no seleccionadas por su emisión infrarroja para comprobar posibles similitudes o diferencias entre ambos casos.

Durante esta tesis, se ha llevado a cabo la reducción completa desde cero de los datos de Lockman-SpReSO. Esto supuso un proceso complejo y delicado que requirió múltiples iteraciones y del diseño de procedimientos específicos, como el realizado para la sustracción de la emisión del cielo en los espectros. A su vez, se elaboró el catálogo al completo del cartografiado, incluyendo toda la información disponible sobre los objetos del proyecto en la bibliografía. La siguiente etapa del proceso consistió en el análisis de los espectros, con el objetivo de detectar y medir las líneas espectrales y determinar el desplazamiento al rojo espectroscópico de los objetos. Además, a partir del desplazamiento al rojo y de todos los datos fotométricos recopilados en el catálogo, se realizaron ajustes a las distribuciones de energía espectral, de los que se derivaron parámetros como la  $M^*$ , la  $L_{\text{TIR}}$  o el exceso de color E(B-V).

Posteriormente, se seleccionó una muestra de galaxias con formación estelar (SFGs, por sus siglas en inglés) a partir de los objetos del catálogo de Lockman-SpReSO. Se analizaron en detalle las líneas espectrales medidas para corregir la ex-

tingción producida por el polvo interestelar y se utilizaron para determinar la SFR y la metalicidad del gas en las SFG. En este punto, la investigación se centró en el análisis de las relaciones globales mostradas por las SFGs. Por un lado, se estudió la secuencia principal de las SFGs, donde se analizó conjuntamente la  $M^*$  y la SFR. Esto mostró que las SFGs del catálogo poblaban la región de galaxias con intensos estallidos de formación estelar. También se estudió la relación entre la  $M^*$  y la metalicidad de las galaxias. Este análisis demostró que la muestra de SFGs seleccionada por la emisión infrarroja tendía a presentar metalicidades más bajas de lo esperado a partir de su  $M^*$  y desplazamiento al rojo. Por último, se estudió la relación en el espacio tridimensional formado por la  $M^*$ , la SFR y la metalicidad del gas. Se comprobó que las SFG seleccionadas por el infrarrojo están bien representadas por las calibraciones existentes de esta relación tridimensional, apoyando así la idea de la universalidad de la relación.

Además, la tesis aborda el estudio de los flujos de material observados en una pequeña fracción de los objetos del catálogo. Este material puede ser expulsado de la galaxia por eventos como estallidos de formación estelar, muertes estelares por supernovas o núcleos galácticos activos dando lugar a la salida de material de la galaxia. Por otro lado, este material puede ser capturado por la galaxia debido a su potencial gravitatorio produciendo una caída de material. El análisis de las líneas de absorción en el rango ultravioleta, como las líneas de MgII y FeII, permite investigar las correlaciones entre la velocidad del viento y la anchura equivalente de las líneas con las propiedades de la galaxia anfitriona, incluyendo la  $M^*$ , la SFR y la tasa específica de formación estelar.

Tesis disponible en:  
<https://www.educacion.gob.es/teseo/mostrarRef.do?ref=2532612>

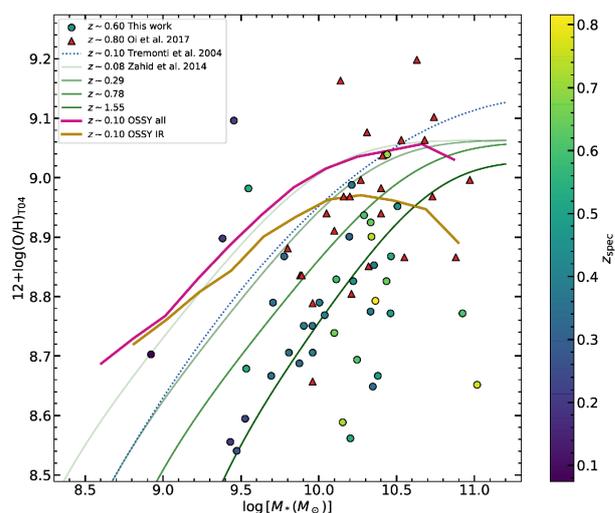


Diagrama de la relación  $M^*$ -metalicidad utilizando la calibración de Tremonti et al. (2004). Los círculos representan la muestra de Lockman-SpReSO con un desplazamiento al rojo medio  $\sim 0.6$  y los triángulos rojos representan las galaxias infrarrojas de Oi et al. (2017) con desplazamiento al rojo medio  $\sim 0.8$ . La línea magenta representa la mediana de metalicidad para cada agrupamiento de masa de todo el catálogo OSSY, mientras que la línea marrón representa el mismo agrupamiento, pero solo para los objetos OSSY con información infrarroja en HELP. Las líneas verdes representan el modelo MZR de Zahid et al. (2014) aplicado a galaxias de los cartografiados SDSS ( $z \sim 0.08$ ), SHELS ( $z \sim 0.29$ ), DEEP2 ( $z \sim 0.78$ ) y COSMOS ( $z \sim 1.55$ ). Tanto en el catálogo OSSY como en los objetos Lockman-SpReSO, se observa que los objetos infrarrojos tienden a ser menos metálicos que los objetos ópticos al mismo desplazamiento al rojo.

## Propiedades observacionales de los vientos del disco de acreción en binarias de rayos X poco masivas

Autoría: Guayente Panizo Espinar

Tesis doctoral dirigida por: Teodoro Muñoz

Darias y Montserrat Armas Padilla

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

Fecha de lectura: 12 de julio de 2024

El depósito de materia sobre objetos compactos (acreción), como agujeros negros y estrellas de neutrones, es uno de los fenómenos más energéticos del Universo, que involucra grandes intercambios de masa y energía. Si bien se observa en multitud de sistemas astrofísicos, su estudio es especialmente relevante en las binarias de rayos X, dado que evolucionan en tiempos característicos relativamente cortos, accesibles para los seres humanos. En el caso concreto de las binarias de rayos X poco masivas, la acreción se produce por la incorporación al objeto compacto de gas proveniente de una estrella menos masiva que el Sol a través de un disco de acreción. Estos sistemas experimentan erupciones (*outbursts*) en las que el ritmo de acreción se incrementa considerablemente, produciendo eyecciones de masa (*outflows*) que pueden estudiarse en varias longitudes de onda. En esta tesis analizamos algunos de los fenómenos asociados a estas eyecciones de materia en tres binarias de rayos X poco masivas.

Los dos primeros trabajos consisten en búsquedas espectroscópicas de un tipo concreto de eyecciones, los vientos poco ionizados, en dos sistemas con inclinación baja o intermedia (siendo la inclinación el ángulo entre la perpendicular al plano

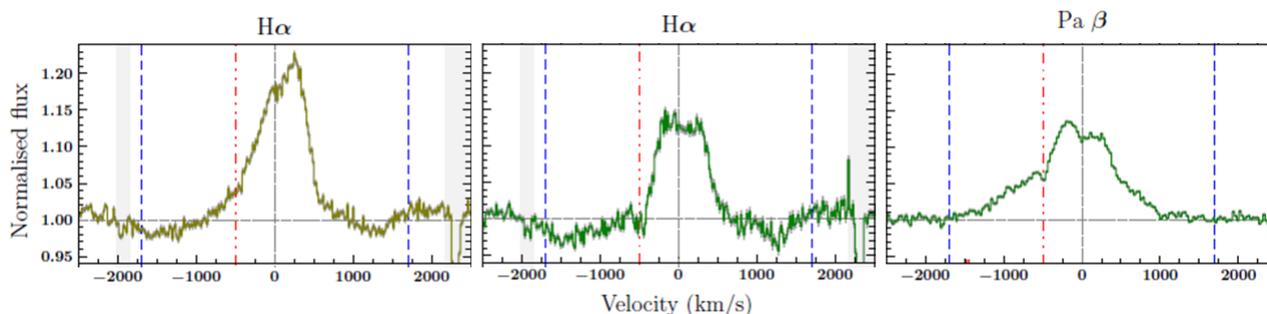
orbital y nuestra línea de visión). En primer lugar estudiamos el sistema Aquila X-1, cuyo objeto compacto es una estrella de neutrones. Para ello, analizamos espectros en el visible obtenidos con el *Gran Telescopio Canarias* durante la erupción de 2016, que fue particularmente brillante. Nuestro trabajo revela características espectrales durante las fases finales de la erupción que son consistentes con la presencia de un viento en el sistema. Se trata de uno de los primeros estudios de este tipo en una binaria de rayos X con estrella de neutrones.

En el segundo trabajo analizamos espectros en el visible y el infrarrojo cercano durante la erupción de un sistema con agujero negro recientemente descubierto, MAXI J1348-630. El estudio de estos espectros, obtenidos con el *Very Large Telescope*, revela características espectrales compatibles con la presencia de vientos (ver la figura). Nuestro trabajo sugiere que estas, apenas estudiadas anteriormente en sistemas de baja inclinación, se observan tanto en el visible como en el infrarrojo durante toda la erupción.

Por último, en el tercer trabajo presentamos un análisis fotométrico del sistema de alta inclinación Swift J1357.2-0933, cuyo objeto compacto es también un agujero negro. Concretamente, este estudio se centra en los *dips*, disminuciones de brillo cuasiperiódicas observadas en su curva de luz en el visible. Estos *dips* ya se habían encontrado anteriormente en otras erupciones del sistema, siendo menos frecuentes a medida que evolucionaba el evento.

Dado que se ha sugerido que este fenómeno podría estar relacionado con las eyecciones en forma de vientos, en este trabajo estudiamos la recurrencia de los *dips* de forma global, abarcando todas las erupciones conocidas de la fuente. Los resultados muestran una correlación con la luminosidad del sistema en el visible y en rayos X.

En resumen, esta tesis se centra en el estudio de vientos poco ionizados en binarias de rayos X, haciendo especial hincapié en la dependencia de sus propiedades con la inclinación del sistema. Los tres trabajos presentados fueron publicados en *Astronomy & Astrophysics* entre los años 2021 y 2024.



Arriba. Ejemplo de las distintas características espectrales encontradas, que asociamos con la presencia de vientos de baja ionización en las binarias de rayos X: alas anchas y asimetrías (panel izquierdo), perfiles con la parte superior plana (panel central) y absorciones desplazadas hacia el azul (panel derecho, marcada con una línea roja).

Derecha: Diagrama HR de todas las estrellas O y B galácticas analizadas dentro del proyecto IACOB, limitadas hasta una distancia de 4000 pc. Las estrellas con más de  $100 \text{ km s}^{-1}$  de velocidad de rotación proyectada se indican con círculos cian, mientras que el resto se muestran en naranja. Las incertidumbres típicas se indican con una barra de error en la esquina inferior izquierda. La TAMS propuesta se marca con una línea discontinua morada. Las trazas evolutivas se han obtenido de la herramienta web MIST para metalicidad solar y sin rotación inicial. La línea verde discontinua corresponde a un ajuste polinómico de segundo orden a los puntos de las trazas donde  $v \text{crit} \sim 220 \text{ km s}^{-1}$ . Los sistemas binarios espectroscópicos de doble línea están excluidos.

# La naturaleza evolutiva de las supergigantes masivas de tipo B: una reevaluación empírica moderna utilizando datos de IACOB, Gaia y TESS

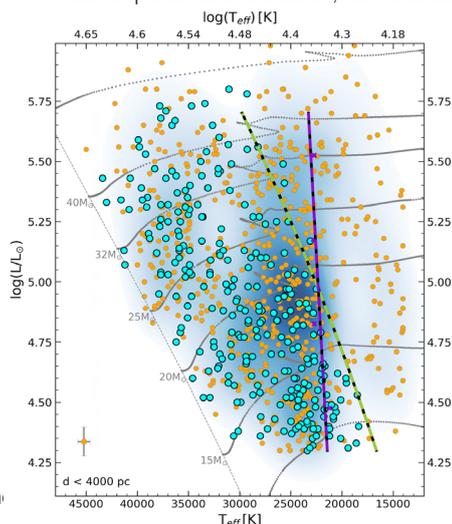
Autoría: Abel de Burgos Sierra (adeburgo@eso.org)

Tesis doctoral dirigida por: Sergio Simón-Díaz y Miguel A. Urbaneja Perez

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

Fecha de lectura: 4 de octubre de 2024

Esta tesis se enmarca en el estudio de las estrellas masivas, las cuales desempeñan un papel clave en la evolución química y dinámica de las galaxias y del propio Universo. Su intensa radiación ionizante, fuertes vientos estelares y energéticos finales, contribuyen a una importante retroalimentación con el espacio circundante. Pese a su importancia, comparaciones entre datos observacionales y modelos teóricos han revelado distintas discrepancias que desafían nuestra comprensión de las estrellas masivas. La fase evolutiva en la que transitan desde la secuencia principal hacia la fase de supergigante roja es una de las más esquivas y, sin embargo, importantes. Comprender las propiedades de las estrellas en esta fase transitoria es crucial para testar las predicciones teóricas de evolución estelar y para nuestro conocimiento general de las estrellas masivas. En los años ochenta, se asumía que las supergigantes de tipo B (BSGs) eran objetos transitorios posteriores a la secuencia principal. En los años noventa se constató la existencia de una sobrepoblación de BSGs en el diagrama *Hertzsprung-Russell* (HR) donde los modelos evolutivos predicen la terminación de la secuencia principal (TAMS). Se sigue sin saber si la posición de la TAMS debe ser redefinida o si la sobredensidad es el resultado de poblaciones superpuestas siguiendo caminos evolutivos diferentes. Una posibilidad es que las BSGs incluyan estrellas en la secuencia principal y estrellas regresando de una fase post-supergigante roja. Ahora también sabemos que una gran fracción de estrellas masivas nacen en sistemas binarios, creando canales evolutivos adicionales. Además, algunas propiedades fundamentales de las BSGs no están tan bien definidas como en el caso de las estrellas O. Entre ellas se encuentran las propiedades rotacionales o las tasas de pérdida de masa, ambas con un impacto significativo en su evolución. Para superar esta situación, es necesario emplear muestras



estadísticamente significativas de BSGs, objetivo principal de esta tesis. Combinando datos espectroscópicos ópticos de alta resolución procedentes del proyecto IACOB (I.P. Simón-Díaz) y del archivo de ESO, en esta tesis se estudiaron casi un millar de estrellas O y B, siendo la mayoría BSGs (mostradas en la figura por debajo de 35000K). Además, la llegada de *Gaia* DR3 y TESS permitió incluir propiedades adicionales, convirtiendo esta tesis en el mayor estudio empírico holístico de las propiedades físicas, químicas y pulsacionales de estos objetos realizado hasta la fecha.

Para lograrlo, una parte significativa pero crucial de este trabajo se dedicó a obtener un alto nivel de completitud entre las BSGs. Esto se hizo mediante la revisión individual de los espectros y la exitosa planificación y ejecución de varias campañas observacionales, alcanzando ~6000 espectros de ~700 de estos objetos, que corresponde al ~70% de las BSGs localizadas hasta 2500 pc de nosotros. El análisis de ensanchamiento de líneas, utilizado para derivar la velocidad rotacional proyectada y el ensanchamiento por macroturbulencia, se hizo utilizando la herramienta *iacob-broad*. La temperatura efectiva, gravedad superficial, microturbulencia, el parámetro de fuerza del viento y las abundancias superficiales de helio, silicio, carbono, nitrógeno y oxígeno, se obtuvieron utilizando un emulador estadístico para espectros sintéticos FASTWIND combinado con un método Monte Carlo, permitiendo un análisis homogéneo. Además, se identificaron las binarias espectroscópicas en la muestra empleando los datos multiépoca.

Estos y otros resultados reunidos en una muestra única de volumen limitado permitieron proporcionar una reevaluación empírica de las principales propiedades de las BSGs y abordar diferentes cuestiones con importantes implicaciones en la evolución de las estrellas masivas:

- Se observó que la distribución de las velocidades de rotación proyectadas de estrellas O y BSGs favorece una baja rotación inicial y un pasado binario para la conocida cola de objetos de rotación rápida.
- Se encontró una correlación positiva entre microturbulencia y macroturbulencia, cuyos orígenes físicos exactos aún se desconocen.
- Nuevas estimaciones de tasa de pérdida de masa revelaron la ausencia del aumento teóricamente previsto y ampliamente aceptado de dicha tasa en la región de biestabilidad del viento.
- Se propuso una nueva localización de la TAMS basada en la caída del número relativo de objetos (línea morada en la figura), coincidiendo con el descenso del número de binarias espectroscópicas.
- La falta de objetos de rotación rápida por debajo de una temperatura efectiva se explica mejor a partir del hecho de que las estrellas llegan al final de la secuencia principal o, alternativamente, alcanzan su velocidad crítica.
- Reuniendo las propiedades físicas, químicas y pulsatorias de la muestra, se investigaron nuevas pistas sobre la naturaleza de las BSGs. En este sentido:
  - Se descubrió un subgrupo de BSGs con atmósferas enriquecidas en helio situadas más allá de la TAMS y con mayores masas espectroscópicas que aquellas con helio normal, siendo fuertes candidatas a productos de interacción binaria.
  - No se encontraron evidencias preliminares de la presencia de post-supergigantes rojas dentro de la secuencia principal.

Como conclusión, los resultados de esta tesis han revelado o constatado importantes propiedades de las BSGs, proporcionado además nuevos puntos de anclaje para futuros modelos evolutivos de estrellas masivas y sentando las bases para los próximos grandes sondeos espectroscópicos como WEAVE-SCIP y 4MOST-4MIDABLE.

Tesis disponible en: <https://arxiv.org/abs/2412.09454>

## Modelado de turbulencia y análisis de datos de ondas gravitatorias para fusiones de binarias de estrellas de neutrones

Autoría: Miquel Miravet Tenés  
(miquel.miravet@uv.es)

Tesis doctoral dirigida por: José Antonio

Font Roda y Pablo Cerdá Durán

Centro: Universitat de València

Fecha de lectura: 10 de octubre de 2024

La plétora de observaciones de ondas gravitatorias procedentes de varios sistemas astrofísicos está cambiando nuestra comprensión de nuestro Universo a un ritmo sin precedentes. En concreto, las observaciones multimensajero de fusiones de binarias de estrellas de neutrones han proporcionado información importante sobre la materia a densidades extremas, la generación de brotes de rayos gamma cortos, la producción de elementos pesados y el ritmo de expansión del Universo.

La comprensión de la compleja física presente en este escenario astrofísico se ha ampliado gracias al uso de simulaciones numéricas. Para describir correctamente estos sistemas, las simulaciones necesitan recursos computacionales prohibitivos para capturar toda la física del problema: una ecuación de estado realista para la materia densa, un esquema preciso de transporte de neutrinos o el tratamiento de la turbulencia a pequeña escala, etc. Simulaciones realistas de fusiones binarias de estrellas de neutrones pueden proporcionar señales de ondas gravitatorias que pueden compararse directamente con detecciones reales. El estudio de la señal de ondas gravitatorias tras la fusión puede restringir la ecuación de estado y aportar información sobre la dinámica y la estabilidad del remanente de la fusión.

Esta tesis presenta un estudio exhaustivo de la turbulencia desencadenada por las principales inestabilidades magnetohidrodinámicas que se desarrollan durante y después de la fusión de dos estrellas de neutrones: la inestabilidad *Kelvin-Helmholtz* y la inestabilidad magneto-rotacional. Además, en esta tesis se muestran diversas aplicaciones de reconstrucciones no modeladas de señales gravitatorias de binarias de estrellas de neutrones y un nuevo enfoque para clasificar rápidamente sistemas binarios de objetos compactos que emiten ondas gravitatorias.

La primera parte de la tesis se centra en el desarrollo de un nuevo modelo de turbulencia en el contexto de fusiones binarias de estrellas de neutrones. Este nuevo modelo, que consiste en resolver ecuaciones de evolución para densidades de energía turbulentas, pretende reproducir los efectos de la física a pequeña escala con una resolución moderada en simulaciones numéricas. La versión del modelo para la inestabilidad magneto-rotacional se ha implementado en simulaciones en gravedad newtoniana de estrellas de neutrones con un campo magnético poloidal y rotación diferencial, y se ha visto que el modelo es capaz de reproducir el transporte de momento angular hacia el exterior de la estrella. Además, esta parte de

la tesis presenta un nuevo estudio analítico del mecanismo de saturación de la inestabilidad magneto-rotacional. El crecimiento de esta inestabilidad se detiene debido a la aparición de inestabilidades parasíticas, las cuales crecen muy rápidamente hasta alcanzar una amplitud similar a la de la inestabilidad magneto-rotacional. Este estudio ha permitido obtener una simple expresión para la amplitud de saturación del campo magnético en función de las amplitudes iniciales de estas dos inestabilidades.

La segunda parte de la tesis está dedicada al análisis de las señales de ondas gravitatorias generadas durante la fase posterior a la fusión de dos estrellas de neutrones. Debido a la naturaleza estocástica de la señal durante esa fase, se han aplicado reconstrucciones no modeladas para estudiar la inferencia de modos inerciales y la detectabilidad de diferencias en el tratamiento de los efectos térmicos con la ecuación de estado. Se ha observado que es posible detectar los modos inerciales, de pequeña amplitud, con observatorios de ondas gravitatorias de tercera generación, como *Cosmic Explorer* o *Einstein Telescope*. Estos modos pueden dar información sobre la ecuación de estado de las estrellas de neutrones y sobre la dinámica del remanente de la fusión, ya que están relacionados con inestabilidades convectivas que se desarrollan en el interior de la estrella. También se ha visto que un tratamiento aproximado de los efectos térmicos en la ecuación de estado puede llevar a diferencias detectables en el espectro de ondas gravitatorias. Por tanto, es importante utilizar una representación tabulada de la ecuación de estado para introducir efectos térmicos de manera consistente. Además, esta segunda parte presenta un nuevo método para clasificar rápidamente sistemas binarios de objetos compactos que son fuente de ondas gravitatorias. Mediante el uso de algoritmos de *machine learning*, se ha desarrollado un método bayesiano para traducir los productos de estos algoritmos de clasificación a probabilidades más realistas que nos dan información sobre la naturaleza del sistema binario, el cual puede estar formado por dos agujeros negros, un agujero negro y una estrella de neutrones, o dos estrellas de neutrones. En los dos últimos casos, puede existir una emisión de radiación electromagnética, por lo que es importante obtener información rápida y fiable sobre la naturaleza del sistema para así llevar a cabo observaciones electromagnéticas de seguimiento.

Los hallazgos de esta tesis han mejorado nuestra comprensión de las inestabilidades que juegan un papel importante en las fusiones de sistemas binarios de estrellas de neutrones mediante el desarrollo de turbulencia magnetohidrodinámica, la cual puede tener un gran impacto en la estabilidad del remanente de la fusión. Además, el trabajo relacionado con el análisis de datos de ondas gravitatorias puede tener implicaciones para futuras aplicaciones de la astronomía de ondas gravitatorias en el estudio de la ecuación de estado de la materia en condiciones extremas y en las observaciones multimensajero de sistemas binarios compactos.

Tesis disponible en: <https://hdl.handle.net/10550/101268> (en embargo hasta mediados de octubre de 2025).

# Análisis combinado del efecto de lente gravitacional débil y el agrupamiento de galaxias con cartografiados fotométricos de galaxias

Autoría: David Sánchez Cid

Tesis doctoral dirigida por: Ignacio Sevilla Noarbe, Francisco Javier Sánchez Lopez y Eusebio Sánchez Álvaro

Centro: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat)

Fecha de lectura: 21 de octubre de 2024

La cosmología observacional ha experimentado avances significativos en las últimas décadas, impulsados por cartografiados fotométricos de la Fase-III como *Dark Energy Survey* (DES), *Hyper Suprime-Cam* (HSC) y *Kilo-Degree Survey* (KiDS). Estos sondeos han permitido mediciones precisas de los parámetros cosmológicos y han puesto de relieve la importancia de abordar la incertidumbre sistemática en la teoría, especialmente a pequeña escala. La reducción de los errores observacionales ha llevado a una leve discrepancia en la amplitud del agrupamiento de materia,  $\sigma_8$ , derivada de estudios del Universo temprano y tardío, lo que podría indicar una posible tensión en el modelo cosmológico estándar o, potencialmente, nueva física.

Esta tesis contribuye al desarrollo de la cosmología observacional optimizando y validando el marco teórico para el análisis del efecto de lente gravitacional débil y el agrupamiento de galaxias en el contexto del DES Año 6 ( $3 \times 2pt$ ), así como presentando un proyecto precursor para el *Vera C. Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time - Dark Energy Survey Collaboration* (LSST-DESC). La combinación de estas técnicas permite establecer restricciones rigurosas sobre los parámetros cosmológicos clave: la abundancia de materia  $\Omega_m$ , la amplitud de fluctuaciones  $\sigma_8$  y su combinación  $S_8 = \sigma_8 (\Omega_m/0.3)^{1/2}$ .

Hemos desarrollado y aplicado modelos avanzados para el análisis de cizalladura cósmica en el DES Año 6, así como para el análisis conjunto del agrupamiento de galaxias y el efecto de lente galaxia-galaxia ( $2 \times 2pt$ ). Exploramos escalas más pequeñas modelando el espectro de potencia de la materia con HMCode 2020, incluyendo una contribución fija de bariones ( $\log T_{AGN} = 7.7$ ), mitigando la contaminación residual mediante cortes de escala optimizados. Además, el modelado del agrupamiento de galaxias se extendió hasta escalas no lineales de 4 Mpc/h utilizando teoría de perturbaciones euleriana para describir el sesgo de la distribución de galaxias respecto a la materia oscura.

Se optimizó la parametrización de la alineación intrínseca de galaxias mediante una combinación del modelo de Alineación No Lineal para la cizalladura cósmica y una versión reducida del modelo de Alineación de Mareas y Torsión de Mareas para los análisis  $2 \times 2pt$  y  $3 \times 2pt$ . También exploramos escalas angulares mayores, extendiendo el análisis de las funciones de correlación angular de cizalladura cósmica hasta 1000 arcmin, sin hallar mejoras significativas en el poder de restricción de

parámetros. Esto subraya la importancia de explotar escalas menores con modelado teórico mejorado.

Nuestros resultados indican que el análisis de  $3 \times 2pt$  de DES Año 6 mejora en un factor de 2 la precisión de los parámetros cosmológicos con respecto al análisis de DES Año 3.

Además, como preparación para LSST-DESC, realizamos un proyecto precursor reanalizando datos de HSC Año 1 con herramientas de medición e inferencia desarrolladas por LSST-DESC. Esto permitió simular el análisis futuro de LSST-DESC Año 1 ( $3 \times 2pt$ ) y comprender los desafíos que enfrentará la próxima generación de sondeos de galaxias. Contribuimos al desarrollo y validación de TXPipe y *Firecrown*, herramientas clave para la medición e inferencia de LSST-DESC, respectivamente.

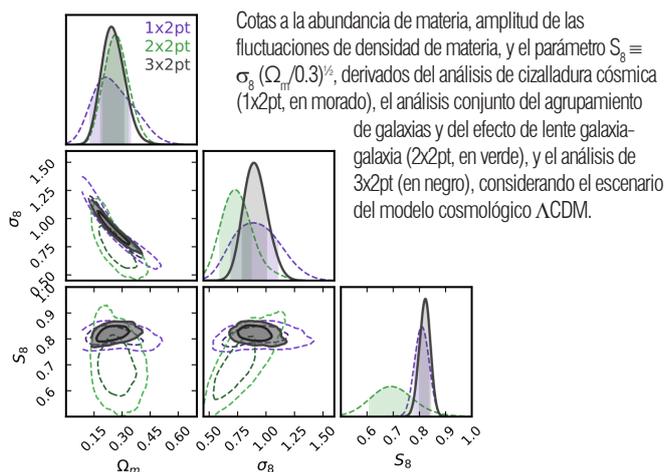
Medimos espectros de potencia angular de la señal  $3 \times 2pt$  en condiciones de cielo parcial con TXPipe, implementamos la corrección pseudo-Cl, realizamos pruebas de robustez y aplicamos por primera vez la deproyección al campo de densidad de galaxias y cizalladura cósmica. En *Firecrown*, implementamos el cálculo de inferencia estadística para parámetros cosmológicos, abordando sistemáticas clave como la alineación intrínseca, la calibración de distribuciones fotométricas de corrimiento al rojo y la calibración de la cizalladura en la forma de las galaxias.

Nuestros principales resultados para HSC Año 1 ( $3 \times 2pt$ ) en el espacio armónico son:  $\Omega_m = 0.236^{+0.065}_{-0.055}$ ,  $\sigma_8 = 0.922^{+0.111}_{-0.098}$  y  $S_8 = 0.815^{+0.021}_{-0.025}$ . También reproducimos los resultados oficiales de cizalladura cósmica de HSC Año 1 con la herramienta de inferencia de LSST-DESC, validando su implementación. Extendimos el análisis para considerar modelos más allá de  $\Lambda$ CDM, incluyendo neutrinos masivos, magnificación por galaxias lente y el modelo wCDM, realizando pruebas de robustez de los resultados obtenidos.

En general, esta tesis contribuye al desarrollo teórico y técnico de análisis conjuntos de lentes débiles y agrupación de galaxias, estableciendo las bases para futuros estudios cosmológicos con sondeos de galaxias de Fase IV. Abordar estos retos permitirá extraer el máximo contenido de información de estos sondeos, impulsando nuestra comprensión del Universo tardío y potencialmente revelando nueva física más allá del modelo estándar de la cosmología.

Tesis disponible en:

[https://drive.google.com/file/d/1q2FOjtiZXNt2GS0ZwoYJBHITIEiBEy1i/view?usp=share\\_link](https://drive.google.com/file/d/1q2FOjtiZXNt2GS0ZwoYJBHITIEiBEy1i/view?usp=share_link)



## Gas y galaxias: trazadores de los cartografiados cosmológicos de cuarta generación

Autoría: Bernhard Vos Gines

Tesis doctoral dirigida por: Violeta González Pérez y Santiago Ávila

Centro: Universidad Autónoma de Madrid

Fecha de lectura: 4 de noviembre de 2024

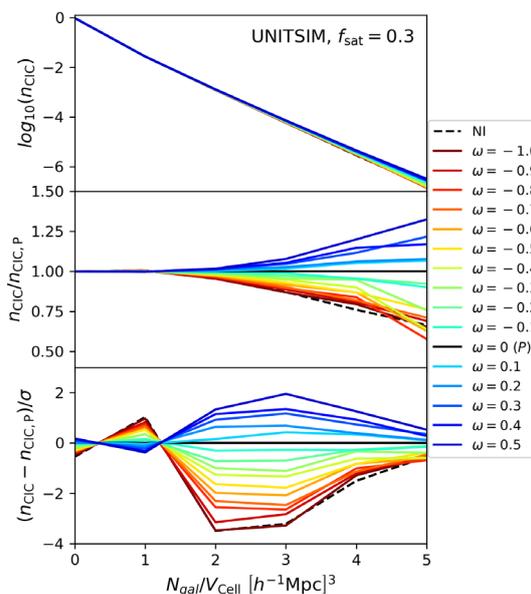
El objetivo de esta tesis es ayudar a analizar e interpretar los resultados de los cartografiados espectroscópicos de galaxias y de hidrógeno neutro, ambos trazadores de la materia oscura. Para maximizar la extracción de información cosmológica de estos observables, necesitamos tener en cuenta los errores sistemáticos de cada cartografiado para no sesgar nuestras conclusiones cosmológicas.

La estructura a gran escala exhibida por los cartografiados espectroscópicos de galaxias contiene información cosmológica. Los cartografiados espectroscópicos de galaxias considerados en este trabajo son el *extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey* (eBOSS) y el *Dark Energy Spectroscopic Instrument* (DESI). eBOSS ha ayudado a constreñir la historia de expansión del Universo a lo largo del 80% de su historia cósmica. DESI es un cartografiado en curso que está ayudando a constreñir los modelos de Energía Oscura, es decir, a comprender mejor la naturaleza de la Energía Oscura.

Los cartografiados de hidrógeno neutro detectan la señal de 21 cm del hidrógeno neutro (HI) en el Universo. En particular, la técnica de *Intensity Mapping* integra la señal de varias fuentes de HI en un píxel tridimensional llamado voxel. El *Square Kilometer Array Observatory* (SKAO) llevará a cabo en el futuro un cartografiado que mapeará el hidrógeno neutro (HI) hasta  $z = 6$ , sondeando por primera vez vastos volúmenes del Universo en la época del Amanecer Cósmico.

En el Capítulo 2 determinamos si la señal de las Oscilaciones Acústicas de Bariones (BAO) puede recuperarse considerando la técnica de *Intensity Mapping* en hidrógeno neutro para el cartografiado SKA a  $z = 1.3$ . Para simular un cartografiado realista de HI nos centramos en modelar los siguientes efectos sistemáticos observacionales: el haz del telescopio y el *foreground removal*, que afectan de manera diferente a la señal cosmológica. Construimos funciones de correlación bidimensionales de la distribución de hidrógeno neutro considerando diferentes intensidades para el haz del telescopio y para el *foreground removal*. Para un caso particular del SKA1-mid a  $z = 1.3$ , encontramos que la señal de BAO puede recuperarse considerando una función radial y una función de correlación de dos puntos en cuña (*mu-wedge* 2PCF), ya que son capaces de eliminar los modos cosmológicos contaminados y conservar la señal de BAO.

En el Capítulo 3 nos centramos en expandir el espacio de parámetros de los modelos empíricos que simulan la conexión galaxia-halo, para mitigar posibles sesgos futuros en la determinación de información cosmológica. Desarrollamos el marco matemático para permitir un rango continuo de varianzas para la función de distribución de probabilidad (PDF) aplicada para modelar las galaxias satélite. En particular, introducimos las distribuciones binomial y binomial extendida como nuevas PDFs en los modelos de *Halo Occupation Distribution* (HOD). Esta PDF aplicada a las satélites es uno de los ingredientes de los modelos HOD que asignan galaxias a halos de materia oscura. Los modelos



Count-in-Cells nCIC ( $N_{gal}$ ) a partir de simulaciones UNIT considerando una fracción de satélites de  $f_{sat}=0.3$ . Se analizan distintas distribuciones: la binomial negativa ( $\omega > 0$ ), la de Poisson ( $\omega=0$ ), Bsub-P ( $-1 \leq \omega < 0$ ) y la Nearest Integer. Arriba: estimador Count-in-Cells nCIC ( $N_{gal}$ ). Medio: la razón entre todos los valores de nCIC y el correspondiente a Poisson nCIC,P ( $\omega=0$ ). Abajo: diferencia entre nCIC y nCIC,P de Poisson, normalizada por el error de *Jackknife*  $\sigma$ .

HOD son rápidos y pueden aplicarse a las simulaciones cosmológicas más grandes, que son necesarias para analizar cartografiados actuales y futuros. Construimos varios catálogos de galaxias variando la fracción de satélites  $f_{sat}$  y la varianza de la PDF, controlada por el parámetro  $\omega$ . Ajustamos estos parámetros libres en nuestro modelo HOD a las Galaxias con Líneas de Emisión (ELG) del cartografiado eBOSS usando varias escalas del monopolo y cuadrupolo de la función de correlación de dos puntos y la función de correlación proyectada. Encontramos que la fracción de satélites y su PDF están degeneradas. Esto indica que *constraints* previos utilizando estadísticas de dos puntos sobre  $f_{sat}$  pueden verse afectadas cuando la varianza de la PDF de satélites se fija a un valor Poissoniano. Obtuvimos un mejor ajuste a los datos de eBOSS al variar un tercer parámetro que controla el perfil radial de las satélites. También exploramos la inclusión de *Counts in Cells* (CIC) para constreñir dos de los parámetros libres en nuestro modelo HOD. En una prueba realizada con solo datos del modelo, CIC tiene el mayor poder de restricción sobre la varianza de la PDF.

En el Capítulo 4 validamos un método para extraer información sobre no Gaussianidades primordiales (PNG) no locales, usando catálogos HOD de Galaxias Luminosas Rojas (LRG). Tenemos que diferentes modelos sobre inflación predicen la existencia de una señal no gaussiana en la distribución de materia en el Universo temprano. En particular, las parametrizaciones no locales de PNG producen una fuerte señal en determinadas configuraciones del biespectro. Usamos un modelo teórico para ajustar el espectro de potencias y el biespectro de catálogos de galaxias, para medir las amplitudes PNG equilateral y ortogonal. Este trabajo nos permite explorar posibles sesgos o problemas presentes en el modelo teórico, que solo ha sido testado con halos de materia oscura hasta ahora. A pesar de que los estadísticos de *clustering* están afectados por la elección del modelo HOD, todos los valores obtenidos para las amplitudes equilateral y ortogonal-LSS de las PNG no locales están de acuerdo dentro de  $1,3\sigma$  con los valores fiduciales de los catálogos de LRGs.

## Análisis químico y búsqueda de estrellas ricas en fósforo

Autoría: Maren Brauner

(maren.brauner@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Domingo Aníbal García Hernández y Thomas Masseron

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

Fecha de lectura: 25 de marzo de 2025

En esta tesis doctoral se investiga el origen galáctico del fósforo (P), un elemento esencial para la vida tal y como la conocemos, pero cuya producción estelar en la Vía Láctea sigue siendo poco comprendida. El trabajo parte del descubrimiento reciente de un grupo de 16 estrellas gigantes, pobres en metales, que presentan abundancias de P entre diez y cien veces superiores al valor solar. Este hallazgo resulta particularmente desafiante para los modelos actuales de nucleosíntesis estelar y la evolución química de la Galaxia, ya que se trata de estrellas de baja masa que no son capaces, por sí mismas, de sintetizar P en tales cantidades. Así, el objetivo central de la tesis es descubrir pistas sobre el progenitor o contaminador de estas estrellas. A largo plazo, identificar el origen de estas anomalías en P podría proporcionar conocimientos valiosos sobre la fuente de P en nuestra Galaxia.

Como primer paso, se amplió la muestra de estrellas ricas en P mediante el análisis de espectros de alta resolución en el infrarrojo cercano (banda H) del sondeo APOGEE-2 DR17. Utilizando el código de síntesis espectral en equilibrio termodinámico local (1D LTE) BACCHUS, se determinaron las abundancias químicas de trece elementos en una muestra seleccionada de estrellas gigantes enriquecidas en silicio (Si), basándonos en la hipótesis de que podría existir una correlación entre las abundancias de P y Si. Esta estrategia resultó exitosa y se identificaron 78 estrellas con sobreabundancias confirmadas de P, lo que convierte esta muestra en la más amplia hasta la fecha. La nueva muestra incluye, además, la primera detección de una estrella rica en P dentro de un cúmulo globular galáctico. Las abundancias de elementos como oxígeno, aluminio, silicio y cerio presentan incrementos significativos (respecto a los valores solares), mientras que otros elementos, como el magnesio o la combinación C+N, no muestran patrones comunes en toda la muestra, probablemente debido a las incertidumbres de las abundancias derivadas.

Uno de los hallazgos más llamativos es la fuerte sobreabundancia de Si, un elemento  $\alpha$ , sin que se observe un aumento similar en otros elementos del mismo grupo, como el calcio o el azufre. Esta anomalía no es consistente con los modelos estándar de nucleosíntesis en estrellas masivas, lo que sugiere que las estrellas ricas en P podrían haber sido contaminadas por fuentes aún no bien caracterizadas (o incluso aún no descubiertas). Además, el análisis de los movimientos orbitales indica que estas estrellas no pertenecen a ninguna subpoblación local diferenciada en la Galaxia, lo cual reduce enormemente la probabilidad de un origen extragaláctico.

La segunda parte del trabajo se centró en el análisis químico detallado de las cuatro estrellas ricas en P más brillantes con espectros ópticos disponibles. Gracias a datos del *Espectrógrafo Echelle Ultravioleta y Visual* (UVES, instrumento del VLT)

y utilizando, de nuevo, el código BACCHUS en 1D LTE, se determinaron abundancias de 48 elementos, incluidos aquellos formados por captura de neutrones, como estroncio, bario y plomo. Estos elementos son clave para entender los procesos de captura de neutrones lentos (s) y rápidos (r). Se observaron importantes sobreabundancias en los elementos del pico s, especialmente en bario, e incrementos más moderados en algunos elementos entre rubidio y estaño. Sin embargo, al comparar los patrones químicos obtenidos con varios modelos teóricos de nucleosíntesis, se concluyó que ningún escenario —ni un único proceso i o s, ni una combinación s e i— logra reproducir completamente las abundancias observadas. Aunque el modelo combinado s e i es el que ofrece el menor número de discrepancias en tres de las cuatro estrellas, la falta de simulaciones hidrodinámicas multidimensionales para el proceso i impide confirmar esta hipótesis con certeza.

Debido a las limitaciones en el entendimiento teórico, la última parte de la tesis se centró en la identificación de nuevas estrellas ricas en P mediante técnicas de aprendizaje automático no supervisado aplicadas al conjunto de datos espectrales de APOGEE-2 DR17. Se utilizaron tres enfoques de agrupamiento: el algoritmo *t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding* (t-SNE), un autocodificador de desenredo (dAE) —aplicado por primera vez a espectros estelares reales— y el *clustering jerárquico aglomerativo* (HAC). Cada uno de estos métodos permitió extraer candidatos potenciales, que luego fueron comparados entre sí para proponer estrategias de validación y establecer prioridades en futuros análisis de abundancias.

La combinación de estos enfoques ha permitido no solo ampliar considerablemente la muestra de estrellas ricas en P, sino también aportar una base sólida para estudiar su origen. Este trabajo demuestra el valor de combinar análisis espectroscópicos detallados con herramientas modernas de inteligencia artificial para abordar preguntas abiertas en la nucleosíntesis estelar y la evolución química de nuestra Galaxia. En última instancia, comprender el origen de estas estrellas peculiares podría ser clave para descubrir la fuente principal de P en la Vía Láctea y, por extensión, en entornos propicios para la vida.

Tesis disponible en:

<https://www.educacion.gob.es/teseo/mostrarRef.do?ref=2602182>

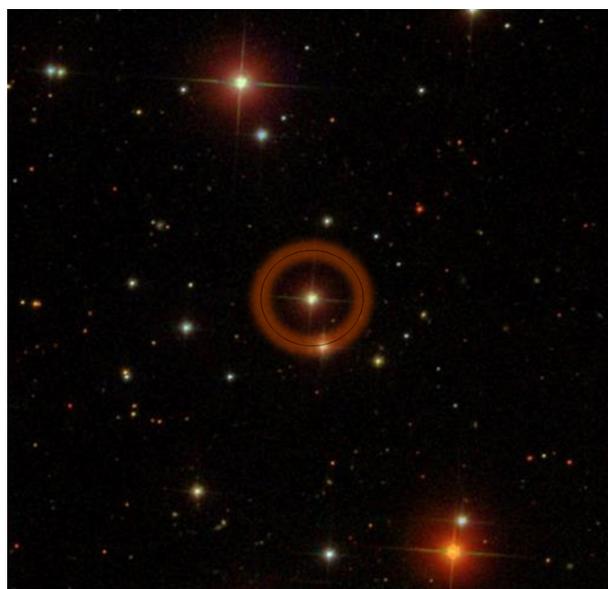


Imagen obtenida del Sloan Digital Sky Survey (SDSS) de una estrella rica en fósforo, M22480199+1411329, analizada en detalle en esta tesis.