

Tratamiento óptimo de contaminantes y sistemáticos para la explotación presente y futura de datos del Fondo Cósmico de Microondas

Autora: Elena de la Hoz López-Collado
(delahoz@berkeley.edu)

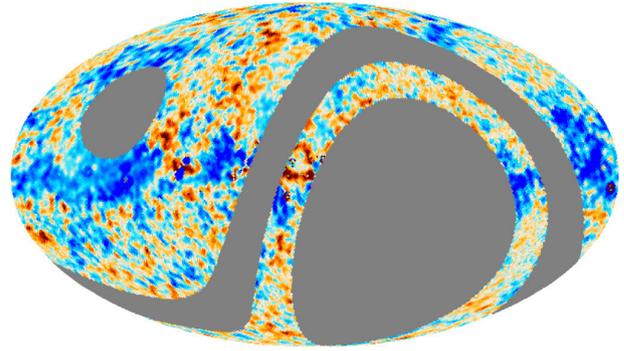
Tesis doctoral dirigida por: Patricio Vielva
Martínez y Enrique Martínez González
Centro: Instituto de Física de Cantabria
(Universidad de Cantabria)

Fecha de lectura: 11 de enero de 2023

La presente tesis doctoral es un compendio de artículos donde se exponen diversas aplicaciones de métodos de separación de componentes paramétricos para abordar los desafíos asociados a la detección de ondas gravitacionales primordiales (OGP) a partir de medidas de polarización del Fondo Cósmico de Microondas (FCM). En particular, se enfoca en la obtención de mapas de FCM libres de *foregrounds*, emisiones en microondas provenientes de fenómenos físicos distintos al FCM y errores sistemáticos. Para esto, se ha aplicado una herramienta de separación de componentes paramétrica Bayesiana llamada B-SeCRET (*Bayesian-Separation of Components and Residuals Estimate Tool*) tanto a datos como a simulaciones realistas de experimentos centrados en el estudio del FCM.

El tratamiento y análisis de datos de polarización del FCM destinados a la búsqueda de OGP requieren técnicas sofisticadas, no solo debido a la pequeña intensidad de la señal que se busca, sino también porque esta es más pequeña que la señal emitida por *foregrounds* y puede ser confundida con errores sistemáticos. Para abordar ambos contaminantes, en esta tesis se ha desarrollado B-SeCRET, un método Bayesiano paramétrico que utiliza un muestreador de conjuntos invariante afín basado en un *Markov Chain Monte Carlo*. Este enfoque Bayesiano busca determinar los parámetros del modelo que se ajustan mejor a las observaciones teniendo en cuenta información *a priori*, permitiendo una estimación robusta y precisa de estos. Esta herramienta se ha utilizado en la tesis con tres objetivos diferentes: 1) estudio y optimización del diseño experimental de un experimento terrestre enfocado en la detección del FCM a bajas frecuencias, 2) control y mitigación de errores sistemáticos debidos a ángulos de polarización calibrados con una precisión insuficiente y 3) caracterización de la densidad espectral de energía (SED) del sincrotrón polarizado en el rango de microondas. A continuación, se detallan los resultados principales de cada aplicación.

La primera aplicación se centra en la óptima detección del *ratio* entre modos tensoriales y escalares (r) con un experimento terrestre centrado en las bajas frecuencias como parte de la iniciativa ELFS (*European Low-Frequency Survey*). En el estudio se exploran dos conceptos diferentes: un experimento independiente con suficiente sensibilidad y bandas espectrales entre 10-120 GHz para detectar las OGP con una precisión de $\sigma(r) \sim 10^{-3}$, o un experimento enfocado solo a las frecuencias más bajas (10-40 GHz) cuyo objetivo sería ayudar a limpiar los *foregrounds* de baja frecuencia a otros experimentos como la misión Lite-



Índice espectral de la emisión de sincrotrón galáctica polarizada en el rango de las microondas obtenida a partir de datos de QUIJOTE-MFI, WMAP y Planck. Mapa en coordenadas galácticas.

BIRD. Los resultados muestran que el primer objetivo solo se podría obtener con un experimento terrestre muy sensible con instrumentos en ambos hemisferios, mientras que el segundo objetivo es fácil de conseguir con la tecnología actual y ayudaría significativamente a la limpieza del sincrotrón, además de otras potenciales emisiones polarizadas como el *spinning dust*.

La segunda aplicación estudia el efecto de una calibración imprecisa de ángulos de polarización y su impacto en la detección de las OGP. Este efecto se prueba en el contexto del experimento Lite-BIRD, y los resultados muestran que si la calibración experimental no es suficientemente precisa, se recupera un valor sesgado de r . Sin embargo, se demuestra que este error sistemático se puede mitigar de dos formas: 1) estimando los ángulos de polarización a partir de los datos multifrecuencia asumiendo que el espectro angular cruzado EB del FCM es nulo y corrigiendo los mapas multifrecuencia con esas estimaciones, o 2) incluyendo los ángulos de polarización en el modelo paramétrico además de información *a priori* sobre los ángulos dentro de B-SeCRET. Ambos enfoques son capaces de mitigar los errores sistemáticos debido a este efecto hasta niveles despreciables, aunque el segundo muestra una mejor caracterización de los ángulos de polarización.

Finalmente, la tercera aplicación se centra en la reconstrucción del SED del sincrotrón polarizado en el rango de las microondas, entre 11 y 353 GHz, a partir de datos del *Multi-Frequency Instrument* (MFI) del experimento QUIJOTE, además de los datos de WMAP y Planck. A partir de estos datos, se ha logrado la primera reconstrucción del índice espectral del sincrotrón en el hemisferio norte a una resolución de dos grados, demostrando finalmente que las variaciones espaciales observadas en este índice son estadísticamente significativas. También se encontró un valor no nulo de una posible curvatura del SED del sincrotrón; sin embargo, no hay suficiente evidencia para determinar si el sincrotrón en el rango de las microondas se ajusta mejor a una ley de potencias o a una ley de potencias con curvatura.

Es importante destacar que todas estas líneas de estudio siguen en desarrollo. En particular, se está estudiando la implementación del segundo concepto de la primera aplicación mediante la incorporación de instrumentos europeos de bajas frecuencias (6-20 GHz) en el telescopio del *Simons Array* para ayudar a limpiar la emisión de sincrotrón del FCM. Por otro lado, dentro de la colaboración LiteBIRD, se ha desarrollado una metodología para estimar simultáneamente los ángulos de polarización y un ángulo de birrefringencia isótropo. Por último, se está llevando a cabo un análisis de separación de componentes centrado en los *foregrounds* de bajas frecuencias con datos de intensidad del MFI y otros experimentos dentro del rango de las microondas.

Tesis disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/29126>

Técnicas de deconvolución dinámicas en observaciones interferométricas

Autor: Alejandro Mus (alejandro.mus@uv.es)

Tesis doctoral dirigida por: Ivan Martí-Vidal

Centro: Universitat de València

Fecha de lectura: 18 de abril de 2023

La técnica de VLBI (por sus siglas en inglés, *very long baseline interferometry*) combina la señal de diferentes antenas distribuidas alrededor del mundo para sintetizar un telescopio del tamaño de la Tierra y superar así las limitaciones que conllevaría construir un único telescopio de dicho tamaño. Gracias a VLBI, la colaboración del *Event Horizon Telescope* (EHTC) ha obtenido las primeras imágenes de dos agujeros negros supermasivos, M87* y SgrA*, a escalas de su horizonte de sucesos. No obstante, esta técnica presenta dificultades. El pobre recubrimiento del espacio de Fourier (el espacio de las visibilidades) hace que existan múltiples imágenes asociadas a una observación. En otras palabras, el problema inverso de obtención de una imagen a partir de datos interferométricos está mal condicionado.

Los retos para obtener imágenes son particularmente notables en el caso de SgrA*. El medio interestelar presente produce un efecto de distorsión. No obstante, la mayor dificultad que presenta este objeto es su rápida variabilidad intrínseca. Su relativa baja masa y tamaño hacen que el periodo orbital de su ISCO sea del orden de minutos. Por ello, nuevos algoritmos que lidien con su variabilidad deben ser desarrollados. Queremos poder obtener imágenes y vídeos.

Existen dos grandes familias de algoritmos que resuelven el problema de la "reconstrucción de imágenes" (o *imaging*): "*Forward*" y "*Backward Modeling*". Mientras que los segundos trabajan en el espacio de Fourier y aplicando deconvoluciones sucesivas que "limpian" la imagen, los primeros suponen una imagen conocida a priori e intentan encontrar la imagen más cercana que mejor se ajusta a los datos. Por supuesto, ambas estrategias presentan sus ventajas y desventajas. No obstante, la necesidad de conocimiento experto por parte del usuario en los "*Backward Modeling*" los hace especialmente sensibles a sesgos.

Por otro lado, los algoritmos de "*Backward Modeling*" pueden ser divididos en "Métodos de optimización", "Métodos Bayesianos" y, más recientemente, "Aprendizaje automático e inteligencia artificial".

En esta tesis se presentan tres nuevos algoritmos, dos siguiendo la filosofía del "*Forward Modeling*" y uno en la de "*Backward Modeling*", nacidos para formar parte de la nueva generación de algoritmos de *imaging* y diseñados para los retos que aparecerán con telescopios de mayor sensibilidad.

En primer lugar, se presenta MOEA/D (*Multi-Objective Evolutionary Algorithm by Decomposition*), un algoritmo de optimización multiobjetivo que descompone el problema de *imaging* en siete problemas de optimización independientes. Estos problemas se resuelven mediante los principios de la evolución Darwiniana.

De este modo, nuestro algoritmo resuelve dos de las grandes carencias existentes en los algoritmos actuales de *imaging*:

1. Evita hacer costosas exploraciones de parámetros. Además, da explícitamente las relaciones entre dichos parámetros.
2. Es capaz de obtener todas las posibles imágenes provocadas por el pobre recubrimiento del espacio de Fourier.

En segundo lugar, se presenta una nueva calibración, llamada "two-components self-calibration". El centro galáctico es un laboratorio astrofísico riquísimo. En él, se pueden encontrar toda clase de objetos astronómicos como remanentes de supernovas, un agujero negro, púlsares e incluso un magnetar. No obstante, la alta variabilidad de SgrA* contamina las observaciones, de tal modo que pueden aparecer efectos espurios en las imágenes que den lugar a confusión con eventos transitorios (*transients*).

En esta parte de la tesis, hemos creado una técnica de calibración que parte de la idea de dividir la fuente en dos partes: una compacta y variable, y otra extensa y constante. Esta técnica nos permite maximizar la información de los datos. Dicho modelado permite construir una ganancia de antena que absorbe la variabilidad intrínseca de la fuente, mitigando los efectos provenientes de la variabilidad.

Con estos datos de alta calidad hemos reconstruido vídeos de los residuos de las imágenes en cada tiempo de integración del interferómetro ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) para buscar *transients*. Puesto que hemos modelado suponiendo que la parte extensa es constante, cualquier *transient* aparecerá en los residuos. Para determinar si un evento es transitorio o ruido, hemos establecido una definición basada en previos trabajos de la literatura.

Finalmente, se presenta el problema de optimización ngMEM o next-generation Maximum Entropy Method. Este problema de optimización con restricciones extiende el concepto de entropía a la dimensión temporal y permite recuperar películas, en lugar de imágenes, de objetos con rápida evolución como es el caso de SgrA*. La solución de dicho problema es la película con máxima entropía en brillo y tiempo.

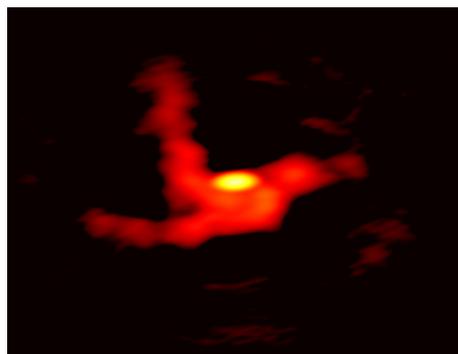
Para ello, se define el concepto de "keyframe", instante concreto de la observación donde se resuelve el problema de optimización. Estos keyframes están relacionados por la entropía temporal y por un "time beam", una correlación Gaussiana que pondera los keyframes según su distancia temporal.

El problema debe satisfacer que:

1. Los datos deben ajustarse a un modelo.
2. Las curvas de luz de la fuente deben ajustarse a las curvas de luz del modelo.

En los capítulos asociados a este problema, hemos mostrado su formulación matemática y presentado ejemplos. Toda la tesis está acompañada de un estado del arte de los algoritmos actuales de reconstrucción de imágenes y películas.

Tesis disponible en: <https://roderic.uv.es/items/f1dda1e9-a766-4824-be2c-114655269e50>



SgrA* visto con ALMA a 230 GHz durante las observaciones del EHT. La imagen de alta calidad se ha obtenido usando la nueva técnica introducida "two components self-calibration".

Envejecimiento y apagado galáctico

Autor: Pablo Corcho Caballero

(corchocaballeropablo@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Yago Ascasibar y

Ángel Rafael López Sánchez

Centro: Universidad Autónoma de Madrid (UAM)

y Macquarie University (MQ; Sydney, Australia)

Fecha de lectura: 27 de abril de 2023

Esta tesis investiga la actividad presente y pasada de formación estelar en galaxias, y los mecanismos físicos que gobiernan la conversión de gas en estrellas en el Universo local. La primera parte se enfoca en estudiar la distribución de galaxias en términos de la tasa de formación estelar específica y la masa estelar total (Corcho-Caballero et al. 2020). Encontramos que la distribución es monomodal, correspondiendo esta a la Secuencia Principal de galaxias formadoras de estrellas, y presenta colas, con forma de ley de potencias, que se extienden en ambos extremos. Este resultado es consistente con el escenario de una única población de galaxias con diferentes niveles de actividad de formación estelar (ver Figura-A). Al comparar los resultados con varias simulaciones cosmológicas, encontramos que estas están de acuerdo con las observaciones hasta el llamado Valle Verde (*Green Valley*), donde las galaxias muestran bajos niveles de formación estelar (Corcho-Caballero et al. 2021a). Por debajo de este límite, la mayoría de las galaxias pasivas en las simulaciones cesaron completamente la formación de estrellas hace varios gigaaños, después de experimentar algún episodio de apagado (*quenching*), mientras que las observaciones parecen indicar que estas galaxias aún conservan niveles residuales de formación estelar (ver Figura-B).

La segunda parte de la tesis consistió en estudiar la historia de formación estelar en galaxias y determinar el papel de los mecanismos que pueden detener de forma abrupta la misma. Hemos desarrollado una herramienta de diagnóstico, denominada Diagrama de Envejecimiento (*ageing diagram*), para discriminar entre galaxias dominadas por evolución secular y aquellos sistemas que recientemente dejaron de formar estrellas. Esta técnica se ha aplicado a varias muestras de galaxias observadas con unidades de campo integral, tanto en escalas resueltas (Corcho-Caballero et al. 2021b) como en escalas globales (Corcho-Caballero et al. 2023a, Corcho-Caballero et al. 2023b), y en combinación con datos sintéticos de simulaciones (ver Figura-C). Los resultados revelan la existencia de dos secuencias galácticas paralelas y estrechas – representando los escenarios de envejecimiento y apagado – indicando que, en lugar de dos etapas de evolución intrínsecas a todas las galaxias, hay dos caminos evolutivos distintos con un final común. Las galaxias pueden volverse rojas debido a la influencia de algún mecanismo de apagado (en escalas de varios cientos de megaaños) o simplemente debido al continuo consumo del reservorio de gas a través de la formación estelar (en escalas de varios gigaaños).

Mostramos que más del 70% de las galaxias en el Universo local evolucionan secularmente, mientras que una pequeña fracción de sistemas, del 5 al 10%, ha sufrido una interrupción brusca en su formación estelar en el último gigaaño. El número restante de galaxias corresponde a una población vieja, cuya antigua formación estelar es difícil de inferir. Concluimos explo-

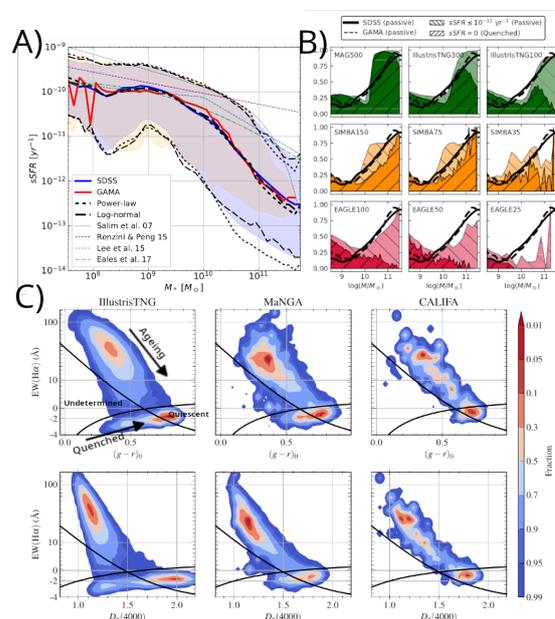
rando las causas físicas del apagado galáctico (Corcho-Caballero et al. 2023b) y encontramos que el entorno es el candidato más probable, especialmente para galaxias satélite de baja masa, aunque también detectamos una pequeña fracción de sistemas de masa intermedia en el campo, cuyo truncamiento de la formación estelar podría estar relacionado con procesos internos (por ejemplo, impulsado por la acción de agujero supermasivos o la morfología).

Los temas tratados durante esta tesis aún requieren respuestas adicionales, que dan lugar a nuevas líneas de investigación actualmente bajo desarrollo:

- Que las galaxias retengan niveles residuales o, en cambio, detengan permanentemente la formación estelar es clave para su evolución posterior en términos de, por ejemplo, su evolución química. Por ello, es vital obtener una estimación robusta de la formación estelar presente en galaxias viejas y rojas, independiente de los métodos tradicionales basados en la estimación de la población ionizante subyacente.
- El apagado o quenching de las galaxias es un proceso complejo que en ocasiones resulta de la acción de diversos procesos físicos. Para entender la formación de galaxias pasivas, es necesario constreñir la tasa de apagado de galaxias durante los diferentes periodos del Universo.

Gracias a la nueva generación de instrumentos y observatorios, tanto terrestres (por ejemplo, WEAVE, Hector) como espaciales (por ejemplo, EUCLID), en los que actualmente estoy involucrado, estas preguntas podrán ser abordadas con una mayor facilidad y precisión.

Tesis disponible en: <https://repositorio.uam.es/handle/10486/709817>



A) Distribución de probabilidad condicional de la tasa de formación estelar específica en función de la masa estelar total (Corcho-Caballero+20). Las líneas azul y roja representan la mediana obtenida de muestras de SDSS y GAMA. El resto de líneas de color corresponden a ajustes previos de la literatura. Nuestro formalismo se ilustra con líneas negras y es capaz de describir la distribución bidimensional completa (las líneas ejemplifican los percentiles 16, 50 y 84 de la distribución). B) Fracción acumulada de galaxias pasivas/apagadas (ver leyenda) en SDSS (línea sólida) y GAMA (línea rayada), comparado con un conjunto de simulaciones cosmológicas (Corcho-Caballero et al. 2021a). C) Distribución de galaxias en el Diagrama de Envejecimiento utilizando IllustrisTNG, MaNGA y CALIFA (Corcho-Caballero et al. 2023a). Las líneas negras representan la prescripción propuesta para distinguir entre los canales evolutivos de envejecimiento y apagado.

Modelos químicos y espectrofotométricos de evolución química

Autor: Iker Millán Irigoyen
(millaniker@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Mercedes Mollá y Yago Ascasibar

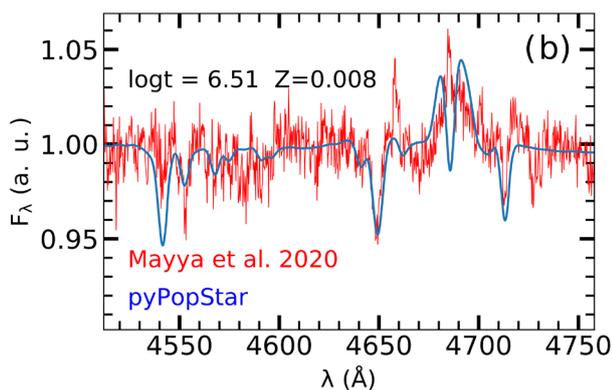
Centro: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

Fecha de lectura: 2 de junio de 2023

La formación y evolución de galaxias estudia cómo se forman y evolucionan los diferentes componentes de una galaxia, gas, polvo y estrellas, a lo largo del tiempo y modificando la contribución que cada una de ellas hace a la luz que recibimos. Además, el estudio de los diferentes componentes nos permite obtener información sobre características galácticas como la edad estelar, la metalicidad estelar, la metalicidad del gas y el *ratio* polvo a gas (DTG). Estas propiedades pueden ser tanto el valor medio, como por ejemplo la edad estelar media, o la propiedad en la etapa final de la evolución de la galaxia, como el DTG o la metalicidad del gas.

Debido a la información diferente y complementaria que nos da cada una, se suelen aplicar dos técnicas distintas para estudiarlas: los modelos de evolución química y los modelos de síntesis evolutiva. Por un lado, la evolución química utiliza la abundancia actual de los metales que hay en forma gaseosa y en polvo en el medio interestelar. Por otro lado, la síntesis evolutiva obtiene las distribuciones espectrales de energía (SED) emitidas por las poblaciones estelares a diferentes edades y metalicidades, lo que nos da la Historia de Formación Estelar (SFH) y las propiedades promediadas del contenido estelar de la galaxia.

Ajuste de población de una región de formación estelar de NGC 1569 de los datos obtenidos por Mayya et al. 2020, en rojo, y HR-pyPopStar, en azul. Los espectros de HR-pyPopStar han sido degradados para tener la misma resolución que las observaciones.



En esta tesis he creado un modelo de evolución química que incluye de manera autoconsistente el ISM como un medio multifase, gas atómico, ionizado y molecular. Además he incluido el ciclo de vida de los granos de polvo, debido a su papel en la regulación del proceso de formación estelar, al ser los principales productores de hidrógeno molecular y proteger a las nubes de la radiación fotodisociadora. Además, una fracción de los metales del ISM acaba en los granos de polvo, lo que resalta la necesidad de modelar correctamente el ciclo de vida del polvo para poder crear un modelo detallado de evolución química. Los resultados reproducen las observaciones de la relación DTG-Z en el rango de metalicidad intermedia y alta, pero se diferencian significativamente en el régimen de metalicidad baja, de acuerdo con otros trabajos publicados. Seguramente esta diferencia viene por las incertidumbres en algunos de los ingredientes del modelo a baja metalicidad.

Respecto al cálculo de espectros en modelos de síntesis evolutiva, he creado una nueva versión del código PopStar (Mollá, García-Vargas, y Bressan, 2009) en *Python* llamada HR-pyPopStar para mejorar la resolución espectral de las SEDs de Poblaciones Estelares Simples (SSPs) de diferente edad y metalicidad. Las SEDs de alta resolución creadas tienen la resolución espectral de $R_{th,5000} \approx 50000$ a 5000\AA . El código utiliza librerías espectrales teóricas más actualizadas para la Secuencia Principal, post-AGB/Nebulosas Planetarias y las estrellas OB y WR. Las SEDs de las SSPs tienen un amplio rango de edades, desde 0,1 Myr hasta 13,8 Gyr, y cuatro metalicidades Z, desde 0,004 hasta 0,05, y se calculan para cuatro Funciones de Masa Inicial (IMFs) diferentes. El espectro de una galaxia estelar cercana, NGC 1569, se ha analizado con los nuevos SSPs, reproduciendo claramente el "bump" azul característico de las estrellas *Wolf-Rayet* debido a las poblaciones estelares más jóvenes. Los espectros se pueden descargar en la página: https://www.fractal-es.com/PopStar/#hr_py_download.

Por último, hemos utilizado los modelos HR-pyPopStar para analizar los espectros de galaxias que albergan supernovas de tipo Ia para ver si las propiedades de las poblaciones estelares de la galaxia tienen alguna correlación con la explosión de la supernova. Esta relación puede servir para mejorar la calibración de las curvas de luz de las SN Ia para estudios cosmológicos. He analizado los espectros de las 680 galaxias en el rango $0,04 < z < 1,0$ usando los modelos de SSPs calculados como base usando el código de análisis espectral FADO.

He obtenido la metalicidad estelar media y la edad ponderadas por masa y luminosidad, $\langle Z \rangle_{M,L}$, $\langle \tau \rangle_{M,L}$, la masa estelar M_* y la SFH. He encontrado una relación Masa - Metalicidad muy similar a trabajos anteriores, pero edades más jóvenes que en dichos trabajos posiblemente debido a las diferentes SSPs usadas como base. Después he calculado el residuo de Hubble, la diferencia entre el módulo de distancia observado en la SN y el cosmológico, usando datos de SALT2.

Finalmente, he buscado correlaciones entre las propiedades de las poblaciones estelares y el residuo de Hubble, encontrando una anticorrelación entre el residuo de Hubble y M_* , como otros autores. También he encontrado una anticorrelación entre HR y $\log \langle (Z/Z_\odot) \rangle_M$ con una pendiente de -0,061 mag/dex. Este resultado apoya hallazgos previos de la literatura realizados bien midiendo la abundancia del gas o la metalicidad estelar promediada (en escala logarítmica), pero con mejor precisión debido al mayor número de objetos de nuestro estudio y al mayor rango de corrimiento al rojo de nuestra muestra.

Caracterización del gas molecular caliente en regiones de formación de estrellas masivas

Autora: Miriam García Santa-María

Tesis doctoral dirigida por: Javier R.

Goicoechea

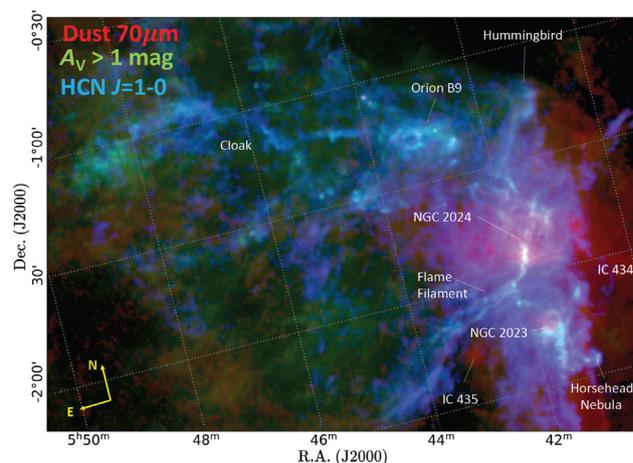
Centro: Dept. Astrofísica Molecular. Instituto de Física Fundamental (CSIC)

Fecha de lectura: 29 de septiembre de 2023

Las estrellas masivas dominan la inyección de radiación y energía mecánica (procesos conocidos como *feedback* estelar) en el medio interestelar (ISM). Estas estrellas se forman en núcleos densos y masivos en el interior de nubes moleculares gigantes (GMCs). El efecto del *feedback* estelar no se limita al entorno más cercano de las estrellas masivas. También controla las condiciones físicas del ISM y la luminosidad emitida a escalas de decenas de pársecs (que aquí denominamos la nube ambiente). Determinar las condiciones físicas y los mecanismos de calentamiento de la nube ambiente es crucial para evaluar el papel que juega el *feedback* estelar a grandes escalas espaciales y entender el proceso de formación estelar masiva en diferentes entornos (núcleos y discos galácticos). Encontrar trazadores químicos adecuados a los diferentes mecanismos de calentamiento del gas, así como trazadores de los núcleos densos que forman estrellas ($n_{\text{H}} \sim 10^4\text{--}10^5 \text{ cm}^{-3}$, $A_V > 8 \text{ mag}$) es muy importante. Hasta hace muy poco, el cartografiado de grandes áreas de GMCs en múltiples líneas moleculares y atómicas era un desafío difícil. En consecuencia, nuestro conocimiento de las condiciones físicas y la composición química a grandes escalas, el entorno extenso de la nube (decenas de pc), es mucho más restringido que en los núcleos de formación estelar ($< 0,1 \text{ pc}$) y protoestrellas (miles de ua).

La nube ambiente se enfría a través de líneas de emisión atómicas de estructura fina y de rotación molecular. Estas líneas trazan diferentes procesos de *feedback* que afectan a una región con formación de estrellas masivas: radiación UV y vientos de estrellas masivas cercanas, choques y rayos cósmicos. Muchas de estas líneas emiten a longitudes de onda en el infrarrojo lejano (FIR) y submilimétrico (submm) y no pueden ser observadas desde observatorios terrestres debido a la pobre transmisión atmosférica. En esta tesis proporcionamos modelos locales que ayuden a interpretar las observaciones extragalácticas, las cuales no resuelven espacialmente los núcleos de formación estelar de la nube ambiente. Uno de los principales objetivos de esta tesis es determinar las propiedades del entorno extenso de una GMC a las escalas espaciales que dominan las observaciones extragalácticas.

En esta tesis estudiamos el entorno extenso de dos de las regiones más representativas de formación de estrellas masivas de la Vía Láctea: Sgr B2 (la región con el mayor brote de formación estelar en el Centro Galáctico) y la cercana región de Orión B (localizada en el disco de la Galaxia). Analizamos cartografiados de la emisión en líneas espectrales (CO, [C I] y [N II]) y de continuo obtenidos con el telescopio espacial *Herschel*. Además, analizamos los cartografiados más grandes (cinco grados cuadrados) observados hasta la fecha con el telesco-



RGB image of a 5-square-degree area of Orion B GMC (G. Santa-María, M., et al., 2023, A&A, 679, A4)

pio IRAM 30m de la emisión de líneas rotacionales de especies moleculares clave: HCN, HNC, CO y HCO⁺.

En Sgr B2 encontramos que, aunque la intensidad de las líneas en cada punto de la nube ambiente es menor que hacia los núcleos de formación de estrellas masivas, la mayor área de la nube ambiente implica que la luminosidad total de la región está dominada por esta última componente. Más del 90% de la luminosidad total emitida por las líneas de CO (mid-J), [C I], y [N II] 205 μm , así como un 80% de la luminosidad del continuo FIR (polvo), provienen del entorno extenso de Sgr B2. La emisión rotacionalmente excitada del CO traza una componente de gas comprimido e iluminado por radiación FUV ($n_{\text{H}} = 10^6 \text{ cm}^{-3}$, $P_{\text{th}} < 10^7 - 10^8 \text{ K cm}^{-3}$). La emisión de las líneas de estructura fina del carbono atómico traza una componente de la nube de menor densidad ($n_{\text{H}} \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ y $T_{\text{K}} \sim 40 - 60 \text{ K}$). Los rayos cósmicos dominan el calentamiento del gas de esta componente.

En Orión B encontramos que aproximadamente un 70% de la luminosidad total emitida en la línea HCN 1-0 proviene de gas a $A_V < 8 \text{ mag}$ (i.e., de gas no denso). El cociente de intensidad de líneas HCN/CO 1-0 muestra un comportamiento bimodal con respecto a la extinción visual de la nube. El punto de inflexión a $A_V \sim 3 \text{ mag}$ es típico del gas translúcido y de los bordes de la nube iluminados por radiación FUV de estrellas masivas cercanas. Encontramos que la mayor parte de la emisión de HCN 1-0 proviene de gas con bajas densidades $n_{\text{H}} < 10^4 \text{ cm}^{-3}$. Las colisiones inelásticas con electrones dominan la excitación de HCN 1-0 a gran escala. Este aumento de la emisión de HCN 1-0 en el gas translúcido explica el comportamiento bimodal del cociente HCN/CO, el cual puede ser alto en gas iluminado por radiación FUV sin ser necesariamente denso.

En esta tesis concluimos que la componente extensa de ambas GMCs debe ser porosa a la radiación FUV, favoreciendo el calentamiento del gas y la formación y excitación de moléculas en el gas extenso lejos de estrellas masivas. Finalmente, es el entorno extenso de las GMCs locales, en lugar de los núcleos de formación estelar, el que sirve como modelo cuando los telescopios no resuelven estos entornos extensos de las GMCs extragalácticas.

Análisis de la formación temprana de las galaxias masivas con datos JWST y HST

Autora: Ángela García Argumáñez
(agarciaargumanez@ucm.es)

Tesis doctoral dirigida por: Pablo Guillermo Pérez González y Armando Gil de Paz

Centro: Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura: 20 de octubre de 2023

Esta tesis pretende avanzar en nuestro conocimiento del proceso de formación y evolución de las galaxias restringiendo la época en la que empezaron a formarse las galaxias más masivas del Universo cercano. Para ello, presentamos un estudio exhaustivo que combina las excepcionales capacidades de *Hubble* (HST) y JWST con una sofisticada técnica de análisis para investigar las primeras etapas en la formación y ensamblaje de masa estelar de progenitores masivos a $1 < z < 4$ de estas galaxias. Este trabajo no solo aborda la cuestión de cuándo comenzaron a formar sus poblaciones estelares, sino que también compara los resultados con las predicciones de simulaciones cosmológicas actuales para explorar sus posibles limitaciones y las revisiones necesarias de los modelos cosmológicos y/o de formación de galaxias.

Nuestros datos incluyen observaciones en imagen de banda ancha en el óptico e infrarrojo cercano de las exploraciones CANDELS con HST y *Cosmic Evolution Early Release Science* (CEERS) con JWST, pudiendo acceder a la emisión espacialmente resuelta de una muestra representativa de galaxias masivas ($M_* > 10^{10} M_\odot$) a $1 < z < 4$. Nuestro enfoque consiste en combinar la información proporcionada por estas poblaciones estelares en dos dimensiones (2D), derivada de la correspondiente síntesis de poblaciones estelares bidimensional (2D-SPS), y desarrollar una metodología que permita inferir las primeras etapas de sus historias de formación estelar (SFHs) de una manera más robusta que cuando solo se utiliza la emisión integrada. Esta tesis puede dividirse en una primera parte sobre el desarrollo y validación de nuestra metodología 2D-SPS con datos de imagen simulados y una segunda parte sobre la aplicación de esta metodología 2D-SPS a observaciones reales de JWST+HST.

Esta metodología 2D-SPS se ha desarrollado y evaluado utilizando la simulación cosmológica *Illustris*, simulación hidrodinámica a gran escala que reproduce las relaciones generales observadas para galaxias a diferentes *redshifts*. *Illustris* proporciona imágenes sintéticas de NIRCcam, ACS y WFC3 que imitan las de exploraciones cosmológicas reales de JWST y HST. Utilizamos estas imágenes sintéticas de *Illustris* para desarrollar y optimizar nuestra metodología 2D-SPS a la hora de inferir las primeras etapas de la SFH global de una galaxia, construida combinando la información de sus poblaciones estelares espacialmente resueltas. La ventaja de utilizar *Illustris* es que podemos acceder a las partículas simuladas individuales que componen cada galaxia dentro de la simulación, lo que nos proporciona la información de partida sobre la formación y ensamblaje de la masa estelar de las galaxias simuladas. La comparación con estos valores verdaderos proporcionados por las partículas simuladas en la galaxia es clave para evaluar la calidad de las SFHs derivadas mediante nuestro método 2D-SPS, especialmente en sus primeras etapas.

Gracias a los árboles de fusiones de *Illustris*, seleccionamos únicamente galaxias masivas a $1 < z < 4$ que son progenitoras genuinas de las galaxias locales más masivas ($M_* > 10^{11} M_\odot$). Utilizamos esta muestra de progenitores masivos $1 < z < 4$ para probar nuestro método 2D-SPS y estudiar su eficacia en recuperar los primeros episodios de ensamblaje de masa estelar a partir de sus SFHs. Para nuestro análisis, cuantificamos las primeras etapas de formación de masa estelar calculando los "tiempos de formación" en los que cada galaxia formó el 5%, 10% y 25% de su masa estelar, calculados directamente de su SFH. Evaluamos la bondad de nuestras estimaciones en términos de su precisión, definida aquí como la mediana de la diferencia relativa entre los tiempos de formación derivados y los valores verdaderos de *Illustris*. Nuestro método consigue recuperar los tiempos de formación con una precisión mediana $< 5\%$ (ver García-Argumáñez et al. 2023). Adicionalmente, comparamos los tiempos de formación inferidos para nuestra muestra de progenitores masivos de *Illustris* a $1 < z < 4$ con los de sus descendientes a $z=0$, y con los calculados para toda la población de $M_* > 10^{11} M_\odot$ galaxias a $z=0$, para obtener información sobre las limitaciones y sesgos que podemos encontrar en las observaciones reales.

A continuación, aplicamos nuestro método 2D-SPS ya validado a galaxias masivas reales observadas con NIRCcam en la primera época de observaciones de JWST/CEERS (junio 2022), para las cuales ya existen imágenes de HST disponibles en el óptico. Encontramos que, en línea con otros trabajos recientes del JWST, las galaxias masivas a $1 < z < 4$ en CEERS comenzaron a formar sus estrellas a *redshift* muy alto: $z \sim 30$ -20 según la SFH mediana de la muestra derivada a partir del análisis 2D-SPS. Además, estas galaxias masivas habrían formado el 5% de su masa estelar presente a $z=1$ (mínimo *redshift* de la muestra) a $z_5 \geq 7.7$, y el 10% a $z_{10} \geq 6.2$ (García-Argumáñez et al. 2024; en preparación). Comparamos estos resultados con las predicciones para galaxias análogas simuladas en *Illustris* y *IllustrisTNG* (simulación sucesora) y encontramos que las simulaciones predicen una formación de la masa estelar más tardía en edad del Universo que la observada en las galaxias de CEERS. Esto podría sugerir posibles deficiencias en los actuales modelos de formación de galaxias incluidos en estas simulaciones en épocas tempranas y/o en el contexto cosmológico general asumido por ellas. En este sentido, los resultados de esta tesis y similares pueden proporcionar importantes restricciones observacionales para futuros modelos cosmológicos y de formación de galaxias.

Tesis disponible en: <https://zenodo.org/records/10217838>

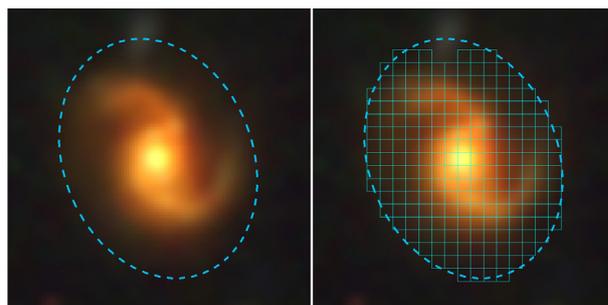


Imagen RGB (3.5" x 3.5") generada con imágenes NIRCcam (R:F356W, G:F200W, B:F115W) de la galaxia de CEERS nircam3-3679 ($z=2.60$; $M_* \sim 10^{11} M_\odot$). Se muestran la apertura integrada y la malla donde se han medido las SEDs en 2D.

Estudio Radiativo-Dinámico de la Gran Mancha Roja de Júpiter

Autor: Asier Anguiano-Arteaga
(asier.anguiano@ehu.eus)

Tesis doctoral dirigida por: Agustín Sánchez-Lavega y Santiago Pérez-Hoyos
Centro: Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea
Fecha de lectura: 13 de noviembre de 2023

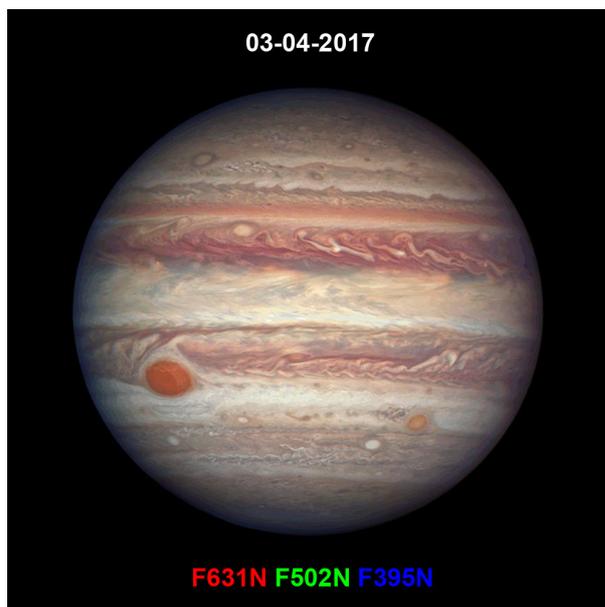
La Gran Mancha Roja de Júpiter (GRS, por sus siglas en inglés) es el mayor y más longevo de todos los vórtices observados en las atmósferas planetarias. Su tamaño ha disminuido a la mitad en los últimos 130 años, su forma se ha vuelto más circular y recientemente se ha demostrado que se está oscureciendo. Aunque la GRS ha sido ampliamente estudiada históricamente, aún quedan muchas incógnitas por resolver.

Uno de los principales interrogantes es el origen de su coloración rojiza, que está directamente relacionada con la distribución vertical y la composición de las nieblas y nubes en niveles atmosféricos superiores ($P < 1$ bar). Varios trabajos han estudiado este problema analizando los espectros de la GRS, trabajando principalmente en los rangos visible e infrarrojo. En 2019, la Gran Mancha Roja inició una serie de interacciones con anticiclones más pequeños que podrían haber cambiado su estructura vertical de nubes, lo que hizo que la región fuera de especial interés para nuestro análisis.

El segundo anticiclón más grande de Júpiter, llamado Óvalo BA, se formó en el año 2000. En 2005, las nubes que rodean el núcleo oval comenzaron a teñirse de rojo y este fenómeno fue ampliamente estudiado. Del mismo modo, el Óvalo BA comenzó a cambiar su color de rojo a blanco en 2018. A diferencia del gran interés suscitado por el cambio de color de 2005-2006, no existían estudios sobre su reciente blanqueamiento anteriores a nuestra investigación.

Como primera parte de esta tesis, se analizaron desde un punto de vista dinámico las interacciones que la GRS experimentó con una serie de vórtices en 2019. En concreto, el autor de la tesis encontró cambios significativos en las velocidades máximas del viento en la GRS, en su forma y en las oscilaciones de 90 días. Tras este estudio se concluyó que la interacción con varios anticiclones fue un fenómeno de superficie que no afectó a la estructura profunda de la GRS.

Para la parte principal de la tesis, se estudiaron un total de trece regiones en el área de la GRS con el *software* de transporte radiativo NEMESIS, para el periodo de tiempo comprendido entre 2015 y 2021 y utilizando imágenes de la cámara *Wide Field Camera 3* del *Telescopio Espacial Hubble*. En concreto, se analizaron las propiedades de nieblas y nubes para niveles de presión inferiores a 1 bar. Nuestro estudio incluyó por primera vez el análisis de datos UV y la adición de restricciones de oscurecimiento del limbo al modelado de los cromóforos en la GRS. Entre otras conclusiones, este estudio condujo a un hallazgo importante: nuestros resultados independientes eran compatibles con el cromóforo más prometedor de la literatura, que resultaría de reacciones químicas entre acetileno y amo-



Composición en color a partir de imágenes captadas por la *Wide Field Camera 3* el 3 de abril de 2017. Los canales R, G y B se corresponden con los filtros F631N, F502N y F395N, respectivamente. Crédito: NASA, ESA, y A. Simon (NASA Goddard Space Flight Center).

nio fotodisociado. Además, se encontró una característica importante de dicho cromóforo: un pico de absorción en la región UV cerca de 350 nm. Esta característica puede ser útil para determinar finalmente la naturaleza del compuesto que da a la GRS su coloración rojiza. También encontramos un segundo cromóforo que estaría situado en una capa extendida (de 500 mbar a 100 mbar) justo debajo del primero, el cual se localizaría en una capa delgada ligeramente por encima de la tropopausa. Aunque el cromóforo superior puede explicar por sí solo la absorción en el visible, tanto el cromóforo superior como el inferior son necesarios para explicar la absorción UV total, como se muestra por primera vez en nuestro análisis. En cuanto al Óvalo BA, el cambio de color rojizo a blanquecino entre 2018 y 2019 es explicado por nuestro modelo con una disminución de la concentración del cromóforo en el óvalo. Sin embargo, la relación de esta disminución con la dinámica local está todavía por ser esclarecida.

En lo que respecta a la parte final de la tesis, se presenta una exploración de las condiciones microfísicas para la generación de aerosoles en la GRS, incluyendo el desarrollo de un código microfísico unidimensional aplicable a todas las atmósferas planetarias. Con dicho código, se pretende determinar las tasas de producción de aerosoles necesarias para explicar un modelo consistente de los agentes responsables de la coloración en la atmósfera joviana.

Tesis disponible en: <https://ehubox.ehu.eus/s/s6N9fTsYHTRyLjy>

Sistemas Herbig Ae/Be: estrellas, discos e interacciones estrella-disco

Autor: Jorge Guzmán Díaz
(joparhp@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Ignacio Mendi-
gutía Gómez y Benjamín Montesinos Comino
Centro: Universidad Autónoma de Madrid

Fecha de lectura: 19 de enero de 2024

En esta tesis se ha contribuido al estudio del régimen de las estrellas Herbig Ae/Be (HAeBes), estrellas presecuencia principal, de masa intermedia y rodeadas de un disco protoplanetario. Dichos objetos poseen propiedades de especial interés. Primero, las HAeBes son el eslabón entre las estrellas T Tauri de baja masa y los objetos estelares jóvenes masivos, por lo que el conocimiento de sus propiedades físicas sirve para conectar los regímenes de baja y alta masa. Segundo, estas estrellas presentan discos protoplanetarios brillantes y extensos, razón por la cual las HAeBes son excelentes candidatas para el empleo de técnicas de imagen a alta resolución y el estudio de la formación planetaria.

Antes del lanzamiento de *Gaia*, e incluso después de este, las HAeBes se solían estudiar en pequeñas muestras esparcidas por el cielo, y sus parámetros estelares y circunestelares se derivaban empleando metodologías diferentes. Además, el número de estas (~ 250) contrasta con las miles de estrellas T Tauri descubiertas, aunque esto se debe en parte a la forma que presenta la función inicial de masa. No obstante, a día de hoy existen miles de candidatas a HAeBes, para las cuales necesitamos confirmar su naturaleza y caracterizarlas. Por otro lado, la mayoría de trabajos suelen asumir que las HAeBes poseen una metalicidad estelar similar a la solar, por lo que no tienen en cuenta las posibles peculiaridades químicas que estas pueden tener (por ejemplo, la peculiaridad λ Bootis), las cuales pueden estar relacionadas con la presencia de planetas. Actualmente existen dos HAeBes que son firmes candidatas a albergar planetas: AB Aur y HD 169142. Sin embargo, dicha cantidad no concuerda con las numerosas subestructuras (cavidades, anillos, espirales,...) observadas en los discos protoplanetarios de estas estrellas que podrían haber sido originadas por planetas.

Nuestro trabajo viene motivado por el contexto expuesto en el párrafo anterior. La primera parte de la tesis se centra en un estudio fotométrico en el que se ha llevado a cabo una caracterización homogénea de una amplia muestra de HAeBes genuinas (209 estrellas) a partir de sus distribuciones espectrales de energía (SEDs) y de sus distancias *Gaia* EDR3. Para derivar los parámetros estelares (temperatura efectiva, extinción visual,

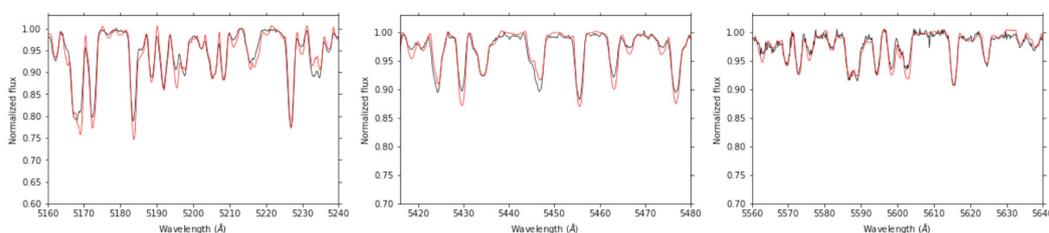
radio, luminosidad, masa y edad estelar) se ha empleado la herramienta online *Virtual Observatory SED Analyzer* (VOSA), la cual nos permite comparar mediante un ajuste chi-cuadrado la fotometría observada con la fotometría sintética extraída de los modelos teóricos. Por otro lado, hemos clasificado las SEDs de nuestras HAeBes siguiendo dos esquemas que se asocian a diferentes propiedades de los discos protoplanetarios. También se derivaron parámetros circunestelares como las tasas de acreción, las masas de los discos o el tamaño de las cavidades internas de polvo. Todos estos parámetros estelares y circunestelares están recogidos en un archivo online llamado HArchBe^[1], el cual se irá actualizando a medida que se vayan descubriendo nuevas estrellas de este tipo. Posteriormente, gracias a esta gran cantidad de datos, se realizó un estudio estadístico robusto centrado en la evolución de los discos. Como resultado principal de este estudio se ha obtenido que el principal mecanismo de disipación que actúa en los discos de las estrellas Herbig Be sea probablemente la fotoevaporación, aunque otros tipos de procesos no pueden ser descartados (por ejemplo, la presencia de un segundo objeto). En cambio, la fotoevaporación no parece ser el mecanismo de disipación dominante en las estrellas Herbig Ae.

La segunda parte de la tesis se ha focalizado en un estudio espectroscópico en el que se han derivado homogéneamente las metalicidades estelares de 67 HAeBes de nuestra muestra mediante síntesis de espectros. Como subproductos del proceso que hemos seguido, también se han estimado las gravedades superficiales y las velocidades de rotación proyectadas. En la figura se muestra, a modo de ejemplo, el ajuste de tres regiones del espectro de HD 142666 con el mejor modelo de Kurucz encontrado. A partir de un estudio estadístico, se ha confirmado una correlación entre las metalicidades y el aspecto de las SEDs. En particular, las HAeBes con una baja metalicidad tienden a tener discos protoplanetarios con cavidades. Además, nosotros aportamos una serie de evidencias que apuntan a la presencia de planetas gigantes como el origen de estas cavidades.

Por último, a raíz del trabajo realizado en esta tesis surgen dos futuras líneas de investigación:

- Identificación y caracterización de nuevas HAeBes: gracias a la base de datos de *Gaia* y a técnicas innovadoras de programación (por ejemplo, *Machine Learning*) se han descubierto miles de candidatas a HAeBes. VOSA puede ser una herramienta opcional para analizar estas estrellas, permitiéndonos caracterizarlas de manera rápida y eficiente.
- Detección de planetas en formación en este tipo de estrellas: como se ha mencionado previamente, a día de hoy se tienen dos HAeBes que son firmes candidatas a albergar planetas. La llegada de los telescopios de clase 30 metros nos ayudará en esta tarea, los cuales nos van a permitir tener una mayor sensibilidad en el rango infrarrojo medio, donde se espera una mayor emisión del material acretao por parte del planeta que se está formando.

[1] <http://svo2.cab.inta-csic.es/projects/harchibe/>



Ajuste de tres regiones del espectro de HD 142666 (línea continua negra) con el mejor modelo obtenido (línea continua roja). El modelo se ha generado con una $T_{\text{eff}} = 7250$ K, $\log g = 4.00$ y $v \sin i = 65$ km/s y $[M/H] = 0.0$, donde T_{eff} es la temperatura efectiva, $\log g$ la gravedad superficial, $v \sin i$ la velocidad de rotación y $[M/H]$ la metalicidad estelar.

Vientos estelares y exo-Tierras: un estudio de su interacción mutua

Autora: Ada Canet Varea (adacanet@ucm.es)

Tesis doctoral dirigida por: Ana Inés Gómez de Castro

Centro: Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura: 21 de marzo de 2024

Dentro de los numerosos factores que influyen en la habitabilidad de un planeta, la presencia de una atmósfera es un elemento crucial para el sustento de la vida. No obstante, la atmósfera de un planeta como la Tierra, lejos de ser estática, es un sistema en constante evolución, con cambios significativos en su composición y propiedades a lo largo de su existencia. La detección y caracterización tanto de planetas extrasolares, así como la observación de la Tierra, revela la existencia de amplias envolturas compuestas fundamentalmente por hidrógeno, correspondientes a diferentes etapas evolutivas del planeta. Debido a su significativa extensión, son susceptibles de ser detectadas a través de trazadores espectroscópicos en longitudes de onda ultravioleta.

A lo largo de todas las etapas evolutivas de un planeta, sus atmósferas están expuestas a un flujo continuo de electrones y protones, acelerado a altas velocidades desde la corona estelar. Estos flujos, conocidos como vientos estelares, transportan consigo el campo magnético estelar y son producto de la actividad magnética de la estrella. Los vientos estelares y las atmósferas planetarias interactúan durante todas las etapas de su vida. Estos vientos modifican la morfología de las envolturas gaseosas planetarias, pudiendo reducir su extensión de forma significativa, así como desencadenar pérdidas de masa atmosférica. Además, la interacción de un plasma magnetizado como el viento estelar y las atmósferas planetarias da lugar a la formación de diferentes estructuras características, como arcos de choque, magnetosferas o colas cometarias detrás del planeta que pueden ser detectables, y cuya extensión y localización depende fundamentalmente de las características de los propios vientos estelares, así como de la atmósfera presente alrededor del planeta.

En la presente tesis doctoral se estudia la interacción entre los vientos estelares y planetas similares a la Tierra en diversas etapas evolutivas; desde la presencia de envolturas primordiales de hidrógeno en etapas prematuras de su evolución, pasando por planetas que han perdido su envoltura primordial, hasta la interacción de planetas con una exosfera similar a la presente en la Tierra. Esta interacción es descrita a través de la evolución magnetohidrodinámica de los plasmas involucrados, donde el fuerte de nivel de acoplamiento no lineal entre las magnitudes fundamentales que controlan la evolución del sistema requiere del uso de la simulación numérica. En este trabajo se ha utilizado el código PLUTO, ampliamente utilizado en la simulación de plasmas astrofísicos.

En un primer estudio se examina la interacción entre exosferas de hidrógeno similares a la terrestre y los vientos estelares de estrellas con diferentes niveles de actividad. La supervivencia de las exosferas de hidrógeno ionizado depende por completo de la intensidad de los vientos estelares. En estrellas muy activas, las atmósferas son rápidamente barridas por los vientos, mientras que en estrellas con una actividad moderada se forman extensos frentes de choque alrededor de estos planetas, incrementando los niveles de densidad en la vecindad del planeta.

En un segundo estudio se investiga el escenario en el que el planeta ha perdido por completo su atmósfera primordial debido a la intensa radiación ultravioleta y en rayos X de la estrella, convirtiéndose en un simple obstáculo rocoso a la propagación del viento estelar. La interacción de los vientos en régimen supermagnetosónico rápido conduce a la formación de frentes de choque, cuya compresión y extensión es parametrizada en función de los números de Mach característicos del viento estelar. La formación de magnetosferas inducidas alrededor del planeta no magnetizado desempeña un papel crucial en la posición estacionaria de los frentes de choque.

En un tercer estudio, se presentan los resultados de la interacción de los vientos estelares y las atmósferas primordiales en planetas similares a la Tierra, considerando la evolución conjunta de estas atmósferas y los vientos estelares hasta la completa evaporación de la atmósfera primordial. La extensión de la atmósfera de hidrógeno es reducida considerablemente en épocas tempranas de la evolución, bajo la acción de vientos de estrellas de alta rotación. En el caso de estrellas de baja rotación, las atmósferas no presentan cambios significativos en su evolución. Sin embargo, la erosión causada por la acción de los vientos estelares es despreciable en comparación con la pérdida de masa ocasionada por la radiación de la estrella. La Tierra constituye un laboratorio a gran escala para estudiar la respuesta de las exosferas de hidrógeno frente al viento solar. Esta tesis concluye con la descripción de la misión EarthASAP, un pequeño satélite lunar diseñado para cubrir dicho propósito y cuya propuesta inspiró el estudio que se presenta en esta tesis.

En resumen, esta tesis representa un estudio exhaustivo de la interacción entre planetas similares a la Tierra y los vientos estelares a lo largo de todas las etapas de su evolución. Este enfoque permite caracterizar la formación de estructuras como resultado de dicha interacción, lo que proporciona información crucial sobre las posibles características de planetas potencialmente habitables.

Caracterización dinámica de las Nubes de Magallanes con los datos de Gaia y las simulaciones KRATOS

Autor: Óscar Jiménez-Arranz

(oscar.jimenez.1996@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Mercè Romero-Gómez y Xavier Luri

Centro: Universidad de Barcelona

Fecha de lectura: 8 de abril de 2024

Las Nubes de Magallanes son las galaxias externas más visibles a simple vista en el cielo nocturno, ya que son muy cercanas a nuestra Galaxia y las más grandes en su vecindad. Debido a su proximidad, la Gran y Pequeña Nube de Magallanes (del inglés, LMC y SMC, respectivamente) proporcionan a los astrónomos una ventana única para el estudio de las complejidades de los sistemas galácticos en interacción gracias a la gran cantidad de características observables en estas galaxias. Esto las convierte en el caso ideal para estudiar las interacciones galácticas, la evolución estelar y los principios fundamentales que subyacen a la formación y dinámica de las galaxias.

Situada a una distancia de aproximadamente 50 kpc, la peculiar LMC presenta un único brazo espiral y una barra estelar asimétrica. La SMC siempre se ha considerado un satélite de la LMC debido a su proximidad. Se encuentra a unos 62 kpc de la Vía Láctea y a una distancia de 20-25 kpc de la LMC. La SMC es una galaxia irregular enana y rica en gas.

Con el lanzamiento de la misión espacial *Gaia* en 2013, se ha inaugurado una nueva era en la observación astronómica, permitiendo el estudio detallado de miles de millones de estrellas. *Gaia* mide con precisión las posiciones, movimientos y distancias (a través de su paralaje) de las estrellas mediante medidas recurrentes a lo largo del tiempo. *Gaia* es el principal esfuerzo científico de la *Agencia Espacial Europea* (ESA) para cartografiar y estudiar las estrellas de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Sin embargo, *Gaia* recopila información de todas las fuentes de luz, lo que incluye también las estrellas de las Nubes de Magallanes, así como asteroides, binarias no resueltas, galaxias no resueltas o cúasares. Las Nubes están lo suficientemente cer-

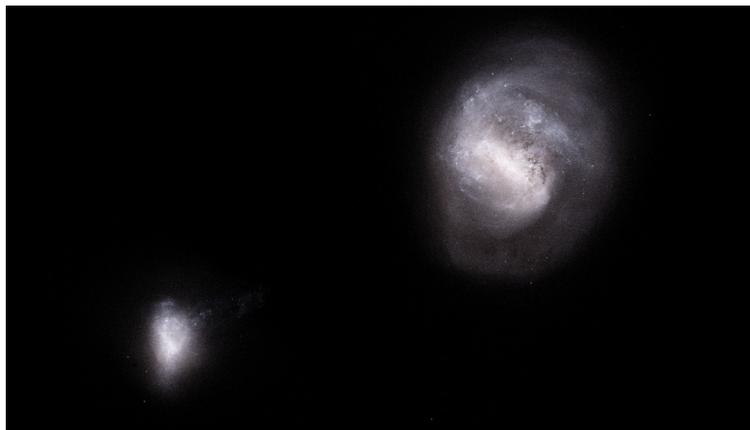
ca como para que *Gaia* sea capaz de resolver individualmente muchas de sus estrellas.

Esta tesis se centra en el análisis cinemático del disco de LMC. Para ello, aplicamos una estrategia de selección basada en redes neuronales para distinguir las estrellas de la LMC eliminando la contaminación de estrellas de la Vía Láctea utilizando la mayor parte de la información disponible de *Gaia*. Con las muestras limpias, generamos perfiles y mapas de velocidad 3D de la LMC usando los movimientos propios y las velocidades de la línea de visión de *Gaia* DR3. Ha sido la primera vez que se genera un conjunto de datos homogéneo de una galaxia que no es la Vía Láctea con información de velocidad 3D para más de veinte mil estrellas. También utilizamos estos mapas cinemáticos para proporcionar nuevas restricciones sobre la velocidad de rotación de la barra estelar de la LMC. Tras el éxito del clasificador LMC/Vía Láctea, entrenamos y utilizamos una red neuronal para separar también las estrellas SMC de la contaminación de estrellas de la Vía Láctea.

Sin embargo, el estudio de la formación del sistema LMC-SMC no se puede realizar solo con observaciones, ya que proporcionan únicamente una imagen estática del sistema. En los últimos años, estos estudios se han centrado en intentar recrear la distribución del gas neutro y la posición y propiedades de las corrientes utilizando simulaciones hidrodinámicas y no la cinemática interna de las Nubes. En este contexto, esta tesis incluye la presentación de KRATOS, una *suite* de 28 simulaciones de N-cuerpos (de libre acceso) de galaxias tipo LMC y SMC. Con estos modelos es posible estudiar la formación de subestructuras en un disco de tipo LMC tras la interacción con un sistema de tipo SMC y compararlas con las observaciones (por ejemplo, los mapas cinemáticos y la velocidad del patrón de barras de la LMC usando datos de *Gaia* DR3). La tesis incluye el primer artículo de una serie que se dedicará a un análisis más específico de la interacción LMC-SMC.

En conclusión, esta tesis proporciona a la comunidad científica un catálogo que distingue las estrellas de la LMC y SMC de las estrellas de la Vía Láctea. Con estas muestras limpias hemos profundizado en el conocimiento de la cinemática interna del disco de la LMC mediante mapas cinemáticos 3D y el análisis de la velocidad de rotación de la barra estelar. Por último, comenzamos a evaluar el impacto de la SMC en la subestructura del disco de la LMC mediante el uso de las simulaciones KRATOS, que continuaremos en futuros trabajos.

Tesis disponible próximamente en: [Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona / Tesis Doctorals / Departament Física Quàntica i Astrofísica](#).



Las Nubes de Magallanes vistas por Gaia. Imagen creada utilizando información del Gaia Data Release 3 (DR3). La contaminación de estrellas de la Vía Láctea se ha eliminado, ya que se han utilizado las muestras NN Complete de Jiménez-Arranz et al. (2023b,a). Créditos y copyright: Ó. Jiménez-Arranz.

Desentrañando el camino de formación de las galaxias lenticulares

Autor: José Luis Tous Mayol
(jtousmayol@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Josep Maria Solanes y Jaime Perea

Centro: Universidad de Barcelona

Fecha de lectura: 12 de abril de 2024

Las galaxias lenticulares (S0) se encuentran en diferentes entornos donde la física que rige su formación puede variar significativamente, desde interacciones gravitatorias de galaxias (fusiones o efectos de marea) hasta interacciones hidrodinámicas del medio intergaláctico con el interestelar. La heterogeneidad observada en las propiedades de esta población de galaxias respalda la existencia de más de un mecanismo de formación, pero tanto la identificación exacta como la contribución relativa de los distintos mecanismos formativos propuestos todavía está sujeta a debate.

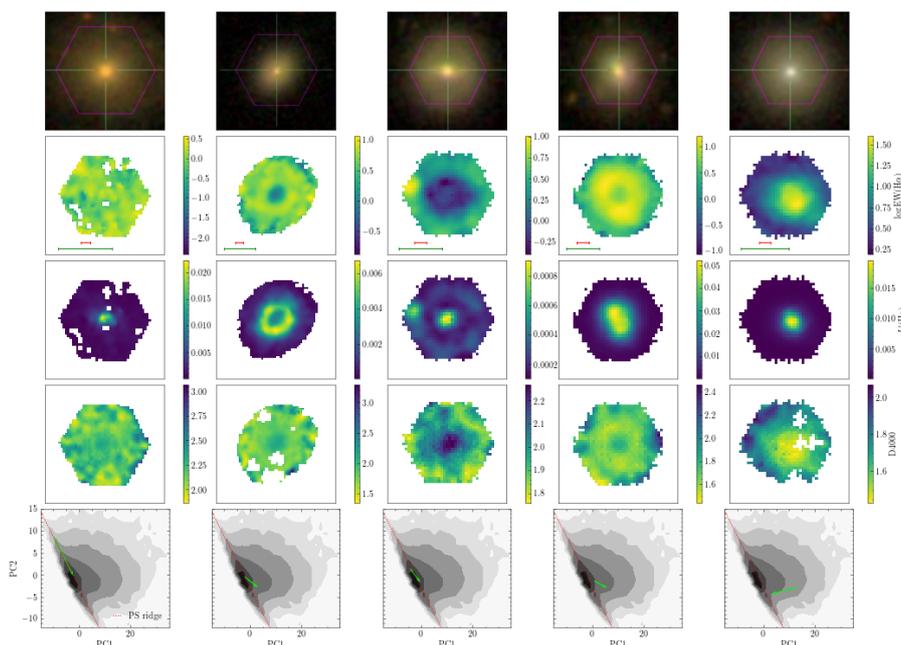
Esta tesis está dedicada a revisar las principales propiedades de las galaxias clasificadas como S0. Nuestro objetivo es reunir información abundante y, sobre todo, sólida sobre los parámetros más relevantes de este tipo morfológico poco compren-

dido y su posible dependencia con el entorno para acotar sus caminos de formación. Por primera vez exploramos todo el espectro óptico de estas galaxias, buscando pistas para inferir su evolución.

Comenzamos la exploración con espectros de fibra única del censo SDSS de una muestra de casi 70000 S0 cercanas y sus propiedades globales. Utilizamos un análisis de componentes principales (PCA) para reducir la alta complejidad de los datos espectrales mediante sus proyecciones en un espacio de baja dimensionalidad, facilitando así una clasificación basada en aprendizaje automático libre de sesgos de las galaxias. El procedimiento revela que la población S0 se compone de dos clases principales con propiedades distintas. Mientras que la clase mayoritaria está formada por lenticulares pasivas con espectros inactivos, la otra se caracteriza por galaxias activas que, pese a su morfología de tipo temprano, muestran ritmos de formación estelar que pueden llegar a ser similares a los observados en espirales de tipo tardío. La principal fuente de ionización de estas galaxias activas es la formación estelar. Sin embargo, en los sistemas S0 de tipo *Seyfert* y LINER detectados en radio y rayos X, la actividad es impulsada, respectivamente, por acreción nuclear y estrellas post-AGB.

Aplicado a espectros resueltos espacialmente del censo MaNGA, el PCA se puede utilizar para estudiar la configuración radial de la actividad en las galaxias. La extensión del PCA a estos espectros nos lleva a identificar anillos de formación estelar en galaxias S0, típicamente asociados con un gradiente de actividad positivo, y a reunir el catálogo más grande de estos objetos jamás identificados a través de este tipo de datos. La evaluación de los anillos indica que son relativamente

Ejemplos de mapas espectrales y perfiles espectrales de galaxias S0 empleados en Tous et al. (2023). Las filas segunda, tercera y cuarta muestran, respectivamente, mapas del ancho equivalente y luminosidad en H α , y del índice espectral D4000. Las líneas horizontales verdes y rojas incluidas en los paneles de la segunda fila indican, respectivamente, el diámetro efectivo de la galaxia y la PSF. La última fila muestra la orientación de los perfiles espectrales de las galaxias proyectados sobre las dos primeras componentes principales. Las imágenes en color de las galaxias se muestran en la primera fila, donde los marcos hexagonales superpuestos indican la región cubierta por MaNGA (fuente de las imágenes: <https://data.sdss.org/sas/dr15/manga/>).



abundantes (~30%) en S0s completamente formadas, con una frecuencia que aumenta bruscamente con la masa de las anfitrionas pero que no se correlaciona con el entorno. Los anillos son dos veces más frecuentes entre los miembros de la clase pasiva que en los activos, y probablemente se alimentan de gas residual del disco. Estos resultados vinculan los anillos con la captura por parte de las S0 de galaxias satélite enanas que orbitan cerca de ellas. Finalmente, examinamos los perfiles de actividad radial de las S0s en función de sus propiedades. La comparación revela que el gradiente de actividad radial de estas galaxias está estrechamente relacionado con sus clasificaciones PCA y BPT y el estado de formación estelar. La clase pasiva a menudo muestra perfiles de actividad de bajo nivel y planos, mientras que sus equivalentes activas generalmente tienen gradientes de actividad negativos, típicamente asociados con un elevado ritmo específico de formación estelar.

En conjunto, nuestros resultados respaldan un escenario en que las fusiones menores podrían desempeñar un papel activo en la evolución reciente de las galaxias S0 rejuveneciéndolas, mientras que los cúmulos operan en dirección opuesta, apagando su actividad. La metodología que hemos desarrollado proporciona una imagen unificada de la actividad en las galaxias S0 en el dominio óptico. En combinación con cantidades físicas y diagramas de líneas de emisión, demuestra ser una herramienta valiosa para interpretar tendencias globales y radiales clave en las galaxias lenticulares que debería ser aplicable a otras morfologías.

Tesis disponible próximamente en: [Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona / Tesis Doctorals / Departament Física Quàntica i Astrofísica](#).