

Evolución del polvo interestelar en las envolturas de las nubes moleculares. Traza observacional y predicciones teóricas

Autora: Leire Beitia Antero

Tesis doctoral dirigida por:

Ana Inés Gómez de Castro

Centro: Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura: 23 de abril de 2021

Esta tesis está centrada en el estudio de la evolución del polvo interestelar en las envolturas de las nubes moleculares y su traza observacional a longitudes de onda ultravioleta. Debido a los tamaños característicos de los granos de polvo, su interacción con los fotones ultravioleta es altamente efectiva y produce trazas notables en la curva de extinción; los más notables son la joroba o *bump* a 2175 Å, producida por grandes moléculas carbonáceas, y la pendiente en el ultravioleta lejano, que tiene origen en los fenómenos de dispersión y absorción de fotones ultravioleta por los granos de polvo más pequeños.

En una primera aproximación, se han estudiado las variaciones estadísticas del *bump* a 2175 Å en los complejos de formación estelar de Orión y Roseta. Este trabajo hace uso de dos grandes cartografiados del cielo: el mapa de fotometría ultravioleta del *Galaxy Evolution Explorer* (GALEX) y el mapa en infrarrojo cercano del *Two Micron All Sky Survey* (2MASS). El estudio de la extinción relativa entre la banda ultravioleta cercana de GALEX, que incluye el *bump*, y la banda infrarroja K s de 2MASS, que da cuenta de la extinción de los granos de mayor tamaño, han permitido identificar variaciones en la población de granos más pequeños debido a procesos de crecimiento en regiones densas, o de destrucción en zonas donde el campo de radiación es más intenso. Este estudio aporta unas medidas estadísticas significativas de las variaciones de la población de polvo, probablemente producidas por el crecimiento de los granos en las envolturas de las nubes moleculares. Este régimen es muy complejo y se requieren simulaciones numéricas para estudiar la evolución de los granos de polvo de menor tamaño.

Los códigos de mecánica de fluidos permiten estudiar la evolución de una nube molecular. Sin embargo, la mayoría de estos códigos no tienen en cuenta la dinámica de los granos de polvo que están embebidos en el gas. En esta tesis se han desarrollado dos módulos que permiten modelar la dinámica y la evolución de una población de polvo interestelar en las envolturas de las nubes moleculares, teniendo en cuenta los fenómenos de crecimiento y destrucción del polvo. El principal resultado de este trabajo es la identificación de estrechos filamentos de polvo que se forman por la acción de los campos magnéticos y que se encuentran desacoplados del gas. Estas concentraciones de polvo favorecen el crecimiento de los granos a pesar de la baja densidad del medio, aunque los procesos de destrucción contrarrestan la eficiencia del crecimiento y limitan el tamaño máximo que pueden adquirir los granos. Estas variaciones en la población de polvo se traducen a su vez en variaciones de la curva de extinción, que son especialmente notorias a longitudes de onda cortas debido a la disminución de la población de granos de polvo pequeños.

En resumen, esta tesis presenta el primer estudio completo de la evolución del polvo interestelar en las envolturas de las nubes moleculares, tanto desde el punto de vista teórico como desde el punto de vista observacional. Mientras que la fotometría ultravioleta permite un estudio estadístico de las variaciones en la población de polvo, las simulaciones numéricas permiten distinguir la influencia de los distintos procesos involucrados en dichas variaciones. Este trabajo predice la formación de filamentos de polvo cargado en las envolturas de las nubes moleculares acoplados al campo magnético, lo que sin duda afectará a la propagación de ondas hidromagnéticas. Además, el crecimiento de los granos en estos filamentos producirá variaciones en la curva de extinción que podrán detectarse a través de observaciones espectroscópicas.

Morfología y metalicidad de galaxias del cartografiado OTELO

Autor: Jakub Nadolny

Tesis doctoral dirigida por: Jordi Cepa,

Ángel Bonigiovanni y Miguel Cerviño

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias

(IAC) y Universidad de La Laguna (ULL)

Fecha de lectura: 14 de mayo de 2021

En esta tesis exploramos el cartografiado OTELO (*OSIRIS Tunable Filter Emission Line Object*). Gracias al uso de los filtros sintonizables del instrumento OSIRIS del *Gran Telescopio Canarias*, OTELO recupera objetos con líneas de emisión hasta flujos muy débiles. El método de tomografía permite construir espectros de baja resolución ($R \sim 700$) para todos los objetos detectados. El flujo de línea límite estimado es de $4,6 \times 10^{-19}$ erg s⁻¹cm⁻², haciendo del cartografiado OTELO el más profundo en flujo de línea disponible hasta la fecha.

En particular, en este trabajo presentamos un catálogo morfológico de los objetos de OTELO detectados en las imágenes de alta resolución del instrumento ACS del *Hubble Space Telescope*. Para ello hemos usado un método paramétrico que ajusta un modelo 2D informado por el perfil de Sérsic, incluido en la versión multionda de la aplicación GALFIT. Este programa ajusta instantáneamente el perfil seleccionado a los objetos seleccionados en las bandas fotométricas disponibles mediante el uso de funciones polinómicas de Chebyshev. Comparando con la versión estándar de GALFIT, mostramos que la versión multionda del mismo programa proporciona resultados más robustos, en particular en el régimen de baja señal a ruido. Adicionalmente, los resultados de la inspección visual de los objetos seleccionados (hasta magnitud $I = 24,5$) son consistentes con los parámetros estimados mediante GALFIT. Usando los mismos parámetros probamos varios métodos de segregación de galaxias tempranas y tardías; también investigamos la relación entre la masa estelar y el tamaño para ambos tipos de objetos. Además de lo anterior, confirmamos la evolución de la mediana de la masa estelar hasta $z = 2$.

Usando el catálogo morfológico descrito, seleccionamos una muestra de las galaxias tempranas en emisión (ET-ELG). La naturaleza y el origen de las líneas de emisión en estos objetos están siendo investigadas aún. Usando una muestra de 14 objetos de ET-ELG a un desplazamiento al rojo, comparamos la densidad de estos objetos con una muestra local análoga extraída del cartografiado SDSS. Encontramos que OTELO detecta una densidad considerablemente mayor de ET-ELG que en la muestra a bajo desplazamiento al rojo del SDSS. Estos resultados se mantienen, aún teniendo en cuenta la varianza cósmica – la fuente de incertidumbre más importante para un cartografiado con una cobertura angular discreta (~ 56 arcmin²) como OTELO.

Por último, investigamos la relación entre la masa estelar y la metalicidad de una muestra de objetos con emisión en H α a $z \sim 0,4$. En particular, y aprovechando la capacidad de OTELO de detectar objetos con flujo límite muy bajo, estudiamos una muestra de emisores de línea con muy baja masa ($\sim 10^7 M_{\odot}$). La gran mayoría de estos objetos están clasificados morfológicamente como galaxias de disco, con un índice de Sérsic bajo, lo esperado para las galaxias con formación estelar activa. No hemos encontrado evidencia alguna de evolución de la relación masa-metalicidad desde $z = 0,4$.

Tesis disponible en: <https://www.educacion.gob.es/teseo/mostrarRef.do?ref=1963899>

Acreción y diagnóstico del viento estelar en el sistema binario de rayos X de alta masa 4U1700-37 a través del análisis espectroscópico de alta resolución en rayos X

Autora: María Martínez-Chicharro
(maria.chicharro@ua.es)

Tesis doctoral dirigida por:

José Miguel Torrejón Vázquez

Centro: Universidad de Alicante

Fecha de lectura: 28 de mayo de 2021

Los sistemas binarios de rayos X con compañera supergigante han suscitado un renovado interés en los últimos años como herramienta para el estudio de vientos estelares en estrellas masivas. Estas estrellas poseen fotosferas tan calientes que constituyen la fuente principal de fotones UV de las galaxias. Sus potentes vientos y su final como supernova, inyectan una cantidad significativa de materia y energía mecánica en el medio interestelar que las convierten en auténticos motores cósmicos. En las binarias de rayos X de alta masa, un objeto compacto (estrella de neutrones o agujero negro) orbita profundamente embebido en el viento estelar de la estrella óptica,

acretando material. Esta acreción alimenta una potente fuente de rayos X que, a su vez, irradia el viento produciendo una serie de transiciones y líneas de emisión cuyo análisis aporta una valiosa información sobre las propiedades del viento, así como del propio flujo de materia acretante sobre el objeto compacto.

En esta tesis se utilizan las observaciones llevadas a cabo por nuestro equipo con el espectrógrafo de rendija de transmisión (HETG) a bordo del telescopio espacial de rayos X *Chandra*, de la NASA, del sistema binario de alta masa con donante supergigante 4U1700-37. Para la reducción de los espectros de alta resolución hemos utilizado el software *ciao* (v 4.4). El análisis espectral se ha realizado con el software *Interactive Spectral Interpretation System* (isis) v 1.6.1-24.

El primer objetivo es estudiar el proceso de acreción y la naturaleza del objeto compacto. El descenso radical de temperatura durante un estallido de rayos X es explicado mediante el enfriamiento Compton, lo que proporciona evidencias de la naturaleza del objeto compacto del sistema 4U1700-37 como una estrella de neutrones magnetizada.

El segundo objetivo es estudiar la estructura/física de las inhomogeneidades del viento estelar a través de la espectroscopía de alta resolución. Se encuentra que: a) el brillo de las líneas de emisión de las transiciones de la capa K, correspondientes a especies neutras, están directamente correlacionadas con la iluminación del continuo. Estas líneas no disminuyen significativamente durante el eclipse. Una posible explicación sería que estas líneas provinieran principalmente del viento estelar. b) Las líneas altamente ionizadas Fe xxv heliogenoide y Fe xxvi hidrogenoide Ly alfa disminuyen durante el eclipse, por lo que deberían producirse cerca del objeto compacto donde el parámetro de ionización es mayor que 3. c) Para describir las líneas de emisión del continuo se requiere la suma de dos modelos de plasma fotoionizado, uno con baja ionización (logaritmo del parámetro de ionización = -1) y otro con alta (logaritmo del parámetro de ionización = 2,4). De las medidas obtenidas para las líneas podemos estimar un cociente de densidades alrededor de 300 entre las zonas de mayor y menor densidad del viento. Para ajustar el complejo del Si xiii heliogenoide, el plasma requiere un ensanchamiento de las líneas debido a movimiento general del plasma. Para reproducir el flujo observado de las líneas r y f es necesario añadir una tercera componente de plasma ionizado colisionalmente. d) El ancho de las líneas no está resuelto, a excepción del silicio. No hay una clara distinción o separación radial entre las especies cuasineutras e ionizadas, lo que es consistente con las inhomogeneidades frías embebidas en el medio caliente y enrarecido que podrían estar constituyendo el viento.

Tesis disponible en: <http://hdl.handle.net/10045/121004>

Cartografiado del cielo del hemisferio norte con QUIJOTE-MFI a 10–20 GHz: construcción y estudio de los mapas, y caracterización de la emisión de microondas del Haze

Autora: Federica Guidi

Tesis doctoral dirigida por: José Alberto

Rubiño-Martín y Ricardo Génova-Santos

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias

(IAC) y Universidad de La Laguna (ULL)

Fecha de lectura: 10 de septiembre 2021

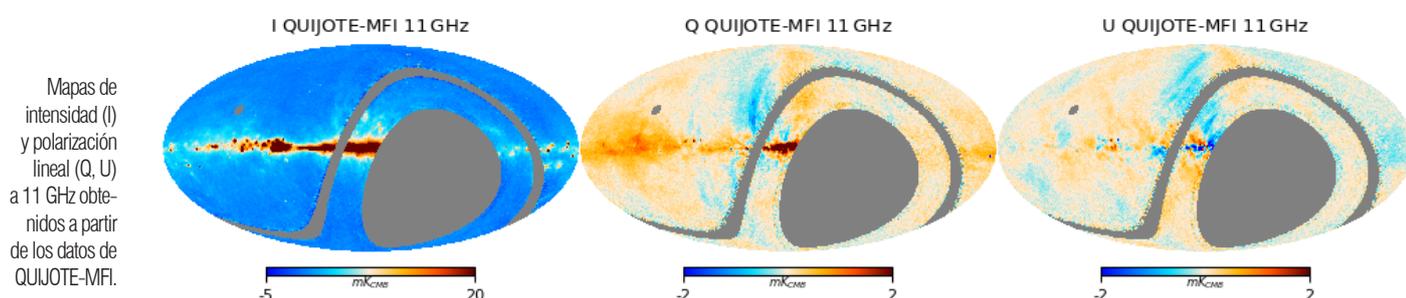
Las ondas gravitacionales primordiales generadas durante la inflación deberían observarse como una huella característica en la polarización en grandes escalas angulares del Fondo de Microondas Cósmico (CMB). Esta huella se conoce como modos B del CMB y aún no ha sido observada. Con el fin de poder obtener una detección limpia de los modos B primigenios, es extremadamente importante caracterizar la emisión Galáctica polarizada de polvo y sincrotrón, y controlar con alta precisión los efectos sistemáticos de la instrumentación de microondas. Esta tesis se desarrolla en este contexto, presentando un análisis de los datos del instrumento MFI del experimento QUIJOTE, que, entre los años 2012 y 2018, midió la intensidad y la polarización lineal del cielo de microondas desde el Observatorio del Teide, en el rango de frecuencias 10–20 GHz. El objetivo de QUIJOTE-MFI es caracterizar con alta precisión la emisión Galáctica de baja frecuencia, en particular la emisión anómala de microondas (AME) y el sincrotrón polarizado, para complementar el estudio de las anisotropías de polarización del CMB.

En esta tesis se ha desarrollado el código de elaboración de mapas PICASSO (Guidi et al., 2021), el cual se utiliza para construir los mapas de intensidad y de polarización lineal del experimento QUIJOTE. PICASSO permite una reconstrucción muy precisa de las grandes escalas angulares de la señal de cielo, siendo esto fundamental para estudios relacionados con los modos B. PICASSO ha sido validado con simulaciones realistas de datos de QUIJOTE-MFI, mostrando que la señal recuperada del cielo diverge menos de un 0,001% de la señal de entrada en multipolos en el rango $20 < l < 200$. El estudio de la función de transferencia del código ha demostrado que el 100% de la señal del cielo se recupera en escalas $l > 10$, con solo un 2% de pérdida de potencia en $2 < l < 8$ para los modos E y B de la señal polarizada.

Este código ha sido aplicado para construir los mapas en intensidad y en polarización de todo el hemisferio norte Galáctico (*wide-survey*), en cuatro frecuencias en el rango 10–20 GHz y utilizando datos obtenidos durante un tiempo efectivo de observación de un año. Esta tesis presenta una caracterización detallada de estos mapas, basada principalmente en el cálculo de sus espectros de potencias. Los espectros de potencias de estos mapas en polarización (que están claramente dominados por emisión sincrotrón) fueron modelados utilizando una ley de potencias $C_l \propto l^{-\alpha}$, con $\alpha = -3.000.16$ para el modo E y $\alpha = -3.090.41$ para el B. Asimismo, se ha medido el cociente entre la amplitud de la potencia de los modos E y B en $l = 80$, obteniendo $ABB/AEE = 0.340.10$. Este valor es menor que el cociente para la emisión de polvo térmico derivado de los datos de Planck ($ABB/AEE = 0.5$; Planck Collaboration et al., 2018c). También se han medido los espectros TB y EB de los mapas, siendo estos compatibles con cero dentro de las incertidumbres, y se ha detectado marginalmente el espectro TE en multipolos bajos. Además, se han presentado los resultados de diferentes pruebas de validación de los datos. Estos resultados se publicarán en Rubiño-Martín et al. (en preparación), que irá acompañado por un conjunto de artículos centrados en la explotación científica de los datos del *wide-survey* de QUIJOTE-MFI. Los mapas se harán públicos una vez aceptadas las publicaciones asociadas.

Por último se analizaron nuevos datos de QUIJOTE-MFI en el Haze, una región que se extiende alrededor del centro Galáctico hasta altas latitudes ($b < 35^\circ$) y que presenta una fuerte emisión en microondas, con contrapartidas en otras longitudes de onda: las burbujas de Fermi en rayos gamma y las regiones elongadas observadas en datos de polarización en radio (a 2,3 GHz). El Haze es una emisión difusa de origen incierto que podría estar asociada con el decaimiento de partículas de materia oscura o con actividad nuclear del centro Galáctico. Utilizando datos de QUIJOTE-MFI, detectamos, con un nivel de confianza de 9, un exceso de señal difusa en intensidad, el cual podría atribuirse a la emisión del Haze, y cuyo espectro presenta una ley de potencias correspondiente a un sincrotrón con índice espectral $H = -2.790.08$ en el rango de frecuencias 11–60 GHz. Este índice corresponde a un espectro con una pendiente ligeramente mayor que la encontrada en resultados anteriores, por ejemplo en Planck Collaboration et al., (2013) donde se obtuvo $H = 2.560.05$. Sin embargo, y de acuerdo con trabajos anteriores, observamos que el espectro del Haze es más plano que el del sincrotrón total en la misma área y rango de frecuencias, el cual presenta un índice espectral $s = -3.000.03$. Además, se observó una diferencia entre el índice espectral de intensidad de las burbujas Norte y Sur del Haze, con un nivel de confianza de 6. Finalmente, se realizó un estudio específico de las estructuras y filamentos polarizados posiblemente asociados con el Haze, que determinó un cambio en el índice espectral hacia valores con una pendiente mayor en bajas frecuencias, en consonancia con lo observado por Carretti et al., (2013). Estos resultados se publicarán en Guidi et al. (en preparación).

Tesis disponible en: <https://www.educacion.gob.es/teseo/mostratRef.do?ref=2040939>



Poblaciones estelares de galaxias masivas en el IR cercano: explotación de nuevas instalaciones de telescopios de gran diámetro terrestres y espaciales

Autor:a Elham Eftekhari Ardakani
(elhamea@ipm.ir)

Tesis doctoral dirigida por:

Alexandre Vazdekis y Francesco La Barbera
Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias
(IAC) y Universidad de La Laguna (ULL)

Fecha de lectura: 26 de noviembre de 2021

Esta tesis tiene como objetivo explotar el rango espectral infrarrojo para el estudio de las poblaciones estelares de las galaxias masivas de primeros tipos. La atención se centra específicamente en los efectos de la variación de la Función Inicial de Masas (incluida su forma en el extremo de muy bajas masas), las abundancias relativas de elementos y la detección de componentes estelares de edad intermedia mediante el análisis de las líneas de absorción de los espectros galácticos. Se investiga y optimiza la metodología para explotar la información disponible mediante la definición de un nuevo sistema de índices espectrales en este rango espectral. Se incluye un amplio conjunto de índices completamente caracterizados no solo en lo que respecta a su sensibilidad a los parámetros de las poblaciones estelares, sino que también se caracterizan los efectos sistemáticos debido a diversos aspectos como el ensanchamiento de las líneas causado por la velocidad de dispersión, desplazamiento de longitud de onda, relación señal-ruido, calibración en flujo y cualquier contaminación debida al cielo. Se ilustra el potencial de esta batería de índices espectrales mediante varias aplicaciones en las que se muestra que es posible romper la degeneración entre la abundancia relativa de elementos α y la Función Inicial de Masas. Ello permite distinguir no solo si dicha función es estándar o dominada por estrellas enanas, sino su forma específica en el extremo de muy baja masa.

Se presenta un análisis detallado de galaxias de primeros tipos enfocado a las bandas de absorción molecular de CO. En comparación con las predicciones de los modelos de poblaciones estelares, el CO en la banda K a $2,3 \mu\text{m}$ es significativamente más fuerte. Se afronta este reto, aún no resuelto, mediante observaciones recientes y datos de archivo, encontrándose que las líneas de CO en la banda H también muestran valores más altos que los modelos, dando lugar a una discrepancia similar a la de la banda K. Se explora el posible origen de tal discrepancia y, aunque no se obtiene una solución completamente satisfactoria, se descarta que la discrepancia sea debida a poblaciones estelares de edad intermedia (dominadas por estrellas AGB de masa intermedia). Sin embargo se identifica un subgrupo estelar con fuertes líneas de CO, pertenecientes a la biblioteca empírica que alimenta los modelos de poblaciones estelares, que podrían contribuir a disminuir la discrepancia observada. Este resultado apunta

al efecto de la abundancia relativa de carbono en las estrellas gigantes de baja temperatura como posible explicación a la fuerte intensidad de las líneas de CO.

En esta tesis se estudia la presencia de poblaciones estelares de edad intermedia mediante la comparación de los índices de CO medidos en una muestra de galaxias de primeros tipos muy masivas con los correspondientes de la galaxia reliquia masiva prototipo, NGC 1277. Esta galaxia alberga poblaciones estelares muy viejas y "prístinas" a lo largo de toda su distancia galactocéntrica por lo que nos ofrece una oportunidad única para investigar el origen de la fuerte absorción de CO característica de las galaxias masivas. Se observa que NGC 1277 no solo muestra valores de CO más altos que las predicciones de los modelos sino que los valores medidos son similares a los encontrados en la población general de galaxias de primeros tipos masivas. Con esta evidencia empírica se puede descartar que la discrepancia observada se deba a la existencia de poblaciones estelares de edad intermedia. Esta interpretación mayoritaria a partir de los primeros estudios en el rango infrarrojo implicaría que las galaxias masivas presentan historias de formación estelar más extendidas en el tiempo, lo cual contrasta con las restricciones obtenidas a partir del rango visible. El nuevo hallazgo obtenido aquí es capaz de conciliar las restricciones obtenidas a partir de los rangos óptico e infrarrojo.

Otro objetivo de esta tesis es poner a prueba las capacidades del instrumento infrarrojo EMIR, instalado en GTC (el mayor telescopio de la actualidad), para el estudio de la historia de formación de las galaxias masivas mediante el análisis de sus poblaciones estelares. Se adoptaron varios enfoques observacionales y se mostró que es posible aprovechar al máximo el potencial de las múltiples rendijas del espectrógrafo EMIR para observar y derivar las poblaciones estelares y los gradientes de las galaxias masivas tanto en cúmulos de galaxias como aisladas y también en galaxias reliquias. Es preciso notar que el advenimiento de la espectroscopía de campo integral en el óptico abrió una nueva era para el estudio de los gradientes de poblaciones estelares. Del mismo modo, la estrategia observacional propuesta aquí para estudiar las variaciones radiales de los parámetros relevantes de las poblaciones estelares supone un avance significativo para estos estudios en el rango infrarrojo. Asimismo en esta tesis se ilustra el proceso de reducción de un conjunto de datos EMIR abordando los problemas que presenta este rango espectral. La identificación de las limitaciones del instrumento y de los datos obtenidos resulta extremadamente útil para la comunidad de astrónomos que desean realizar estudios espectroscópicos de líneas de absorción con EMIR.

Tesis disponible en:

<https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/26882/Stellar%20populations.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Espectroscopía de estrellas FGKM para la explotación científica de la búsqueda de exoplanetas con CARMENES

Autor: Emilio Gómez Marfil

Tesis doctoral dirigida por: David Montes

Gutiérrez y Hugo Martín Tabernero Guzmán

Centro: Universidad Complutense de Madrid

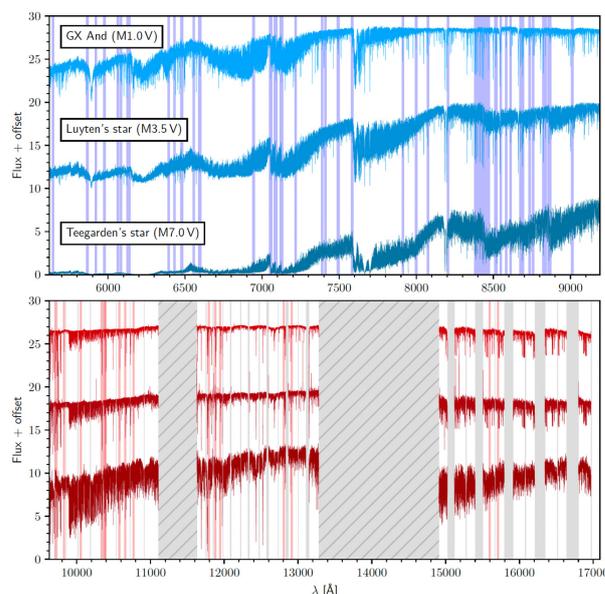
Fecha de lectura: 4 de febrero de 2022

El interés que suscita la búsqueda de exoplanetas ha impulsado el desarrollo de espectrógrafos de alta resolución como CARMENES, instalado en el telescopio de 3,5 m del observatorio de Calar Alto en Almería (España) y diseñado para mejorar las medidas de velocidad radial y permitir así la detección de planetas de tipo terrestre alrededor de estrellas distintas al Sol. Entre ellas, las enanas de tipo M constituyen candidatos ideales dada su ubicuidad en el vecindario solar, sus bajas temperaturas y masas, lo que favorece las detecciones mediante las técnicas de velocidad radial y de tránsitos.

En este contexto, la determinación de los parámetros atmosféricos estelares es crucial para caracterizar los sistemas planetarios y arrojar luz sobre su formación y evolución. CARMENES, gracias a su alta resolución y su cobertura espectral simultánea en el óptico y el infrarrojo cercano, proporciona información valiosa para el análisis de las estrellas frías y brinda la oportunidad de volver a evaluar técnicas clásicas, como el método de las anchuras equivalentes y la síntesis espectral, para estimar el impacto de la región infrarroja en el cálculo de parámetros estelares.

El objetivo principal de la tesis doctoral ha sido la caracterización de estrellas de tipos FGKM observadas con CARMENES en el contexto de la librería estelar y el programa de observaciones de tiempo garantizado del instrumento. Para ello, se han empleado el método de anchuras equivalentes y la técnica de síntesis espectral sobre espectros de alta resolución en el óptico ($R = 94600$, 5200–9600 Å) y en el infrarrojo cercano ($R = 80400$, 9600–17100 Å). Los espectros de estrellas de tipo FGK se han caracterizado con el código STEPAR como implementación del método de anchuras equivalentes, mientras que los espectros de estrellas de tipo M se han analizado con el código STEPARSYN, una implementación bayesiana de la síntesis espectral basada en cadenas de Markov Monte Carlo. Ambos códigos son adecuados para una determinación precisa de los parámetros atmosféricos estelares de estrellas FGKM, en particular la temperatura efectiva T_{eff} , la gravedad superficial $\log g$ y la metalicidad estelar $[\text{Fe}/\text{H}]$. Como parte integral del estudio, se han empleado diferentes modelos de atmósfera (MARCS, BT-Settl y PHOENIX-ACES) y códigos de transferencia radiativa (MOOG y *Turbospectrum*).

El análisis ha permitido caracterizar 65 estrellas de tipo FGK y 343 enanas de tipo M observadas con CARMENES. La cuidadosa selección de 653 y 23 líneas de Fe I y Fe II, respectivamente, útiles para el método de anchuras equivalentes, ha significado doblar el número de líneas usadas típicamente en estudios restringidos a la región óptica. De la misma manera, 75 líneas de Ti I y Fe I, magnéticamente insensibles, han sido seleccionadas, junto con las bandas de TiO, para el análisis de las enanas de tipo M con síntesis espectral (ver figura). Para evitar degeneraciones, se han impuesto *priors* en



Espectros modelo obtenidos con CARMENES de GX And (M1.0 V), la estrella de Luyten (M3.5 V) y la estrella de Teegarden (M7.0 V) en el canal óptico (panel superior) y en el canal infrarrojo (panel inferior). Las regiones sombreadas en azul y rojo denotan los rangos sintetizados para el análisis con STEPARSYN. Las regiones severamente afectadas de absorción telúrica en el canal infrarrojo se muestran rayadas y sombreadas en gris. El resto de las regiones sombreadas en gris marcan los huecos espectrales entre órdenes.

T_{eff} y $\log g$ basados en la información fotométrica multibanda disponible para la muestra. Además, con el objetivo de servir como punto de referencia para validar los resultados, se han destacado diferentes submuestras de especial interés, como las estrellas de referencia *Gaia*, los sistemas binarios FGK+M y M+M, así como las enanas de tipo M con medidas interferométricas del diámetro angular.

El código STEPAR ha demostrado ser una implementación robusta del método de anchuras equivalentes para el análisis de estrellas entre tipos F6 y K4. Como limitaciones del método, se requiere una relación señal-ruido mayor que 20 y una resolución espectral superior a 30000. Además, es necesario excluir binarias espectroscópicas, así como estrellas con velocidades de rotación superiores a 15 km s⁻¹.

El estudio del impacto de las líneas infrarrojas de Fe I y Fe II en la determinación de parámetros de estrellas de tipo FGK seleccionadas de la librería estelar de CARMENES ha revelado una escala en T_{eff} más profunda que parece estar vinculada a una mayor sensibilidad de estas líneas infrarrojas a T_{eff} . Sin embargo, la escasez de líneas de Fe II en la región infrarroja ha impedido un análisis que dependa de esta ventana únicamente.

La metodología empleada para el análisis de las enanas de tipo M ha resultado adecuada en el rango M0.0 V a M7.0 V, pero no más allá, debido a la escasez de líneas de Ti I y Fe I y a la insensibilidad de las bandas de TiO a T_{eff} . Aunque la escala de T_{eff} obtenida concuerda con las de la literatura, se observan grandes discrepancias entre las escalas de $[\text{Fe}/\text{H}]$. No obstante, hay congruencia con la distribución de metalicidad en el vecindario solar y buena correlación con la pertenencia cinemática de las estrellas a las poblaciones Galácticas. Además, se encuentra buena concordancia en T_{eff} para las enanas de tipo M con determinaciones interferométricas del diámetro angular, así como en $[\text{Fe}/\text{H}]$ entre las componentes en sistemas binarios FGK+M y M+M incluidos en la muestra.

Tesis disponible en: https://webs.ucm.es/info/Astrof/invest/actividad/tesis/tesis_EMarfil.html

Las relaciones de la formación estelar en galaxias luminosas en el infrarrojo

Autora: María Sánchez García
(mariasg_1993@hotmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Santiago García Burillo y Miguel Pereira Santaella
Centro: Universidad Complutense de Madrid
Fecha de lectura: 8 de marzo de 2022

La formación estelar tiene lugar en el interior de densas y frías nubes compuestas principalmente de gas molecular, denominadas nubes moleculares gigantes (GMCs). Su estudio en galaxias es en la actualidad objeto de gran interés, pues seguimos sin comprender en detalle cuáles son los mecanismos físicos que impulsan la formación de estrellas. Profundizar en este estudio es primordial para entender cómo se forman y evolucionan las galaxias.

Con el objetivo de comprender el proceso de la formación estelar en galaxias, en esta tesis hemos obtenido observaciones a escalas comparables a los tamaños de las nubes moleculares de galaxias caracterizadas por sus altas luminosidades infrarrojas. Estas galaxias son las denominadas galaxias luminosas en el infrarrojo (LIRGs). Comenzamos estudiando la galaxia NGC1068 que es una galaxia cercana ($D \sim 14 \text{ Mpc}$), espiral y barrada clasificada como Seyfert 2, que se caracteriza por tener un núcleo activo (AGN) y brotes intensos de formación estelar dispuestos en su anillo. Después extendemos el análisis a una muestra de 16 LIRGs locales ($14 \text{ Mpc} < D < 80 \text{ Mpc}$) que engloban diferentes morfologías: desde galaxias aisladas hasta objetos formados a partir de fusiones de galaxias. Hemos realizado este trabajo a partir de observaciones interferométricas a gran resolución angular de diferentes líneas moleculares en el rango de longitud de onda milimétrica. Además, hemos complementado estas observaciones con imágenes de la emisión de la línea Pa-alpha en el infrarrojo cercano. Nuestro trabajo ha estado enfocado principalmente al estudio de la ley de formación estelar, $\Sigma \text{SFR} \propto \Sigma \text{gas}^n$, cubriendo un amplio rango de densidades del gas molecular y escalas espaciales. Para realizar este estudio hemos llevado a cabo las observaciones y el análisis necesario para obtener las cantidades físicas con las que determinar las propiedades del gas y la tasa de formación de estrellas jóvenes. A partir del estudio de las relaciones de formación estelar en NGC1068, observamos la existencia de una cierta escala espacial, $\sim 300\text{-}400 \text{ pc}$, por debajo de la cual no se encuentra una correlación entre el gas y la tasa de formación estelar. A escalas mayores, sin embargo, se recupera la correlación. En la muestra de LIRGs encontramos que existe un comportamiento dual en la relación de formación estelar a escalas de 90 pc en el 25% de los objetos de la muestra. A medida que las escalas espaciales van aumentando, 250-500 pc, esta dualidad desaparece.

Una prescripción alternativa de las relaciones de formación estelar es la que relaciona la eficiencia de la formación estelar con la autogravedad del gas. Esta prescripción, junto con otras basadas en cantidades físicas como la dispersión de velocidad y la fracción de gas denso, muestra la importancia del entorno dinámico del gas a la hora de formar estrellas. En el caso de NGC1068, observamos que la interfaz barra-anillo potencia la formación estelar en esa zona. A distancias cada vez mayores

de dicha región, la formación de estrellas disminuye en el anillo. En el caso de la muestra de LIRGs encontramos que las regiones centrales de las galaxias con comportamiento dual son más eficientes con el aumento de la dispersión de la velocidad y la autogravedad del gas, en comparación con las regiones más externas de estas galaxias.

A partir de estos resultados encontramos que:

- La descripción canónica de las leyes de formación estelar donde la tasa de formación de estrellas depende exclusivamente de la cantidad de gas muestra claras desviaciones de un comportamiento universal: las relaciones de formación estelar dependen críticamente del trazador de gas utilizado, de la escala espacial, de la población de galaxias elegida y, dentro de cada galaxia, del entorno dinámico.
- Hay una dependencia de la eficiencia con la autogravedad del gas. Nuestras observaciones indican que una versión más universal de ley de formación estelar requiere de la inclusión de otras variables, no solo de la densidad de gas. El estado dinámico de la nube cambia y viene dictado por la dinámica a gran escala de la galaxia.
- Además, nuestros resultados muestran por primera vez claros indicios de bimodalidad encontrada en una fracción significativa de las galaxias extremas de nuestra muestra, que está asociada a la existencia de dos entornos dinámicos muy diferentes: las regiones centrales frente a las regiones externas de los discos.
- Nuestros resultados suponen una validación clave de los modelos de la formación estelar que dan gran importancia a la influencia del entorno a la hora de formar estrellas en las galaxias. Los resultados obtenidos en esta tesis motivan a seguir trabajando en:
- El estudio de las leyes de formación estelar en entornos dinámicos diferentes. En particular, es muy relevante averiguar la influencia que la actividad nuclear puede tener en la formación de estrellas en las galaxias.
- Encontrar cuáles son los mecanismos que explican la dualidad encontrada en las leyes de formación estelar en una parte de las galaxias extremas de la muestra de LIRGs. Aumentar el número de objetos de la muestra a partir de la realización de observaciones a gran resolución angular de diferentes líneas moleculares que incluyan un número significativo de objetos que cubran diferentes grados de actividad nuclear, presencia o no de brazos, y diferentes grados de interacción permitirá avanzar en ello.
- Validación y mejora de simulaciones y modelos. Este tipo de estudios proporcionan contrapartidas observacionales clave para validar las recetas implementadas en las simulaciones cosmológicas de la formación de galaxias que actualmente alcanzan resoluciones espaciales de algunas decenas de pc, comparables a escalas de las GMCs.

La relación litio-edad: Calibración con cúmulos abiertos y asociaciones

Autora: Marta Lúthien Gutiérrez Albarrán
(mlgutierrez@ucm.es)

Tesis doctoral dirigida por: David Montes
Gutiérrez

Centro: Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura: 10 de mayo de 2022

El litio es un elemento muy frágil que se destruye fácilmente en los interiores estelares, disminuyendo lentamente con el tiempo en la superficie de estrellas de tipo solar y poco masivas. Por ello, el litio puede usarse para estudiar la evolución estelar y es particularmente relevante para determinar la edad de cúmulos estelares. Las abundancias de litio (derivadas de la línea de Li en $6707,76 \text{ \AA}$) para estrellas de tipo tardío dependen fuertemente de la edad, pero también muestran un patrón complejo que depende de diferentes parámetros, desde la rotación a la actividad cromosférica, la metalicidad o los mecanismos de mezcla. La mejor forma de poder calibrar estos efectos es analizando en detalle conjuntos de estrellas de la misma edad, como cúmulos abiertos y asociaciones estelares.

En esta tesis partimos de una muestra de 42 cúmulos abiertos y asociaciones observados por la exploración GES, en un rango de edades desde 1 Ma a 5 Ga, con el objetivo de estudiar el litio como indicador de edad para estrellas de tipos tardíos FGK en la presecuencia principal y secuencia principal, y de esta forma llegar a una calibración empírica de la relación Li-edad.

Este proyecto ha hecho uso de los datos proporcionados por el último lanzamiento de datos de GES (iDR6) y por *Gaia* EDR3. *Gaia*-ESO (GES) es una gran exploración espectroscópica pública que proporciona una visión homogénea de la distribución de la cinemática y la estructura dinámica y química de la Galaxia. GES ha tomado datos de una gran cantidad de estrellas y de casi 100 cúmulos estelares, usando el espectrógrafo multiobjeto FLAMES del *Very Large Telescope* (ESO, Chile) para obtener tanto espectros de alta resolución con UVES como de resolución media con GIRAFFE.

En primer lugar, hemos realizado un detallado análisis de pertenencia para obtener listas de estrellas candidatas para cada uno de los 42 cúmulos, utilizando todos los parámetros disponibles y basándonos en los siguientes criterios: primero llevamos a cabo un estudio cinemático de las distribuciones de velocidades radiales, combinado con el análisis de los movimientos propios y las paralajes proporcionadas por *Gaia*. Se utilizan indicadores de gravedad como $\log g$ y el índice y para descartar contaminantes gigantes de campo y de esta forma obtenemos, como resultado paralelo, un número de gigantes ricas en Li que listamos por su interés. Reforzamos las selecciones astrométricas utilizando la fotometría de *Gaia* en diagramas color-magnitud y usamos la metalicidad $[\text{Fe}/\text{H}]$ para descartar contaminantes adicionales. Con todo esto, estudiamos las candidatas en diagramas de $\text{EW}(\text{Li})$ frente a T_{eff} y obtenemos listas finales de candidatas.

Todos estos análisis de pertenencia se han complementado con una minuciosa búsqueda bibliográfica para cada cúmulo, recopilando todos los datos previos sobre abundancias de Li, estimaciones de edades, velocidades, astrometría, metalicidades y estudios previos de pertenencia. Las selecciones preliminares de candidatas para 20 de los cúmulos de la muestra

también se publicaron en 2020 en un artículo de A&A, al que se puede acceder en [este enlace](#).

Obtenidas las selecciones de candidatas, hemos llevado a cabo un estudio comparativo para poder cuantificar las dispersiones de Li observadas en cada cúmulo y analizar su dependencia con diferentes parámetros: rotación, indicadores de acreción, actividad cromosférica y metalicidad. Para el estudio de la rotación usamos tanto las velocidades de rotación proporcionadas por GES ($v \sin i$), como una serie de períodos de la literatura, incluyendo datos de TESS, K2 y Kepler. Hemos estudiado y confirmado varias correlaciones y comportamientos descritos en la literatura: observamos, por ejemplo, que candidatas con más litio tienden a ser más rápidas rotadoras y usualmente también son más activas. Por último, hemos observado cómo la metalicidad puede influir en el nivel de disminución de Li para cúmulos de las mismas edades, según sean más o menos metálicos.

Con toda esta información pasamos a la última parte del proyecto, la de calibrar una relación Li-edad. Para ello hemos creado una serie de envolventes empíricas de litio para edades claves en nuestra muestra, desde unos pocos Ma a varios Ga. Para obtener envolventes de la manera más completa posible, hemos delimitado también la zona de la LDB (el límite de disminución de litio) para los cúmulos con edades de 15-500 Ma con ayuda de varios modelos. Una aplicación de estas envolventes a la hora de usar el litio como indicador de edad es poder representar estrellas de edad desconocida en diagramas de $\text{EW}(\text{Li})$ frente a T_{eff} y usarlas como guía para estimar sus edades.

Como trabajo futuro, tenemos como objetivo principal utilizar esta relación Li-edad y las envolventes que hemos obtenido para poder estimar las edades de estrellas de campo observadas por GES cuya edad es aún desconocida, y así poder confirmar su pertenencia a diferentes grupos cinemáticos estelares de diferentes edades. Otro punto de interés es el estudio de las gigantes ricas en litio observadas en el campo de estos cúmulos durante el análisis de pertenencia, dada la naturaleza excepcional de estas estrellas y su utilidad a la hora de entender el comportamiento del litio estelar.

Tesis disponible en: <https://drive.google.com/drive/folders/1HiSBFfc30hMHubOZFzVUU5uWSTXQIJQ>

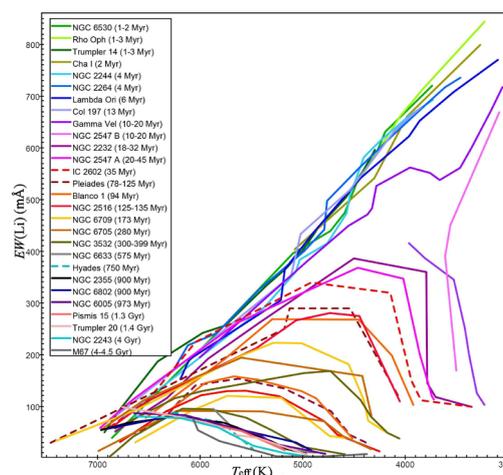


Diagrama de $\text{EW}(\text{Li})$ frente a T_{eff} mostrando las envolventes de Li empíricas obtenidas para 27 de los 42 cúmulos de la muestra, incluyendo los cúmulos jóvenes (1–50 Ma), así como los de edad intermedia (50–700 Ma) y los cúmulos viejos (> 700 Ma). Estas figuras también incluyen las envolventes de Li que se han usado a lo largo de esta tesis, mostradas en líneas discontinuas: La envolvente superior de $\text{EW}(\text{Li})$ para el cúmulo IC 2602 (35 Ma), mostrado en rojo; las envolventes superior e inferior para el cúmulo de las Pleyades (78–125 Ma), mostradas en rojo oscuro; y la envolvente superior para el cúmulo de las Híades (750 Ma), en turquesa.