

En busca de señales de nueva física en Cosmología

Autor: Nicola Bellomo

(nicola.bellomo@austin.utexas.edu)

Tesis doctoral dirigida por: Licia Verde

Centro: Institut de Ciències del Cosmos - Universitat de Barcelona

Fecha de lectura: 24 de enero de 2020

La Cosmología es el estudio de los orígenes y la evolución de nuestro Universo como un todo. Aunque bajo el lado teórico la Cosmología nació hace un siglo, con la formulación de la teoría de la Relatividad General por Albert Einstein, ha sido únicamente en las últimas décadas que ha habido un avance experimental tan importante que se ha transformado desde una ciencia “pobre de datos” a una ciencia “guiada por los datos”. Estamos viviendo la que se dice ser la “Edad de Oro” en Cosmología: no solo tenemos suficientes evidencias experimentales para medir parámetros cosmológicos con una precisión alrededor del uno por ciento, sino que también podremos ir más allá de esa precisión con los experimentos planeados en las próximas décadas, que probarán por primera vez épocas de nuestro Universo nunca observadas directamente hasta ahora.

En esta tesis se analizan tres aspectos fundamentales del modelo estándar que se utiliza hoy en Cosmología, el modelo Λ CDM. Los ingredientes principales de este modelo son una teoría de la gravedad que describe cómo nuestro Universo evoluciona, en este caso la Relatividad General; las diferentes componentes que existen en nuestro Universo, es decir fotones, neutrinos, bariones, materia oscura fría (en inglés CDM) y energía oscura, descrita por una constante cosmológica Λ ; y una teoría que explica las condiciones iniciales del Universo, que asumimos ser la teoría de la Inflación. Aunque décadas de investigación nos permiten describir muchos de estos aspectos en gran detalle, aún hay varios problemas en los tres ámbitos. El objetivo de esta tesis es explorar cómo estos problemas abiertos pueden encontrar una posible solución; en particular se discute cómo nuevas muestras experimentales y nuevos avances teóricos pueden jugar un papel en responder a estas preguntas abiertas.

La primera parte se centra en la posible degeneración entre efectos que neutrinos y teorías de gravedad modificada tienen en las observables cosmológicas. En el trabajo “Hiding neutrino masses in modified gravity cosmology” se investigó cómo la teoría de Horndeski, que es la teoría más general que incluye un campo escalar que tiene ecuaciones del movimiento del segundo orden y que obedece al principio de equivalencia débil, tiene suficiente libertad para reproducir una expansión como la que predice el Λ CDM y, al mismo tiempo, puede incrementar el crecimiento de las estructuras a grandes escalas. Dicho crecimiento, si se produjera a escalas del orden de 100 Mpc o más pequeñas, podría esconder los efectos que los neutrinos masivos tienen en el espectro de potencia de la materia.

En la segunda parte se debate uno de los candidatos a ser materia oscura, es decir, agujeros negros primordiales que se

formaron en las primeras fracciones de segundo de nuestro Universo. Primero se enseña cómo, empezando desde los límites superiores que ya existen para agujeros negros primordiales que tienen una distribución de masa monocromática, es posible obtener límites superiores en la abundancia de agujeros negros primordiales que tienen una distribución de masa extendida. Además, se establece cómo validar si todas las asunciones hechas en la parte de modelización teórica se cumplen en el caso de distribuciones de masa extendidas. Luego se explica cómo, relacionando mapas de galaxias y mapas de ondas gravitatorias generadas por los sondeos de galaxias y los observatorios de ondas gravitatorias, se puede llegar a entender cuál es el origen de los agujeros negros que forman las binarias detectadas. Resulta que ya con experimentos que funcionan, como DESI para galaxias y ALIGO para ondas gravitatorias, se puede tener una primera indicación sobre el origen estelar o primordial, aunque se necesitarán los experimentos de la siguiente generación para tener la confirmación definitiva.

La tercera parte describe cómo se puede obtener nuevas pruebas sobre las primeras fracciones de segundo de nuestro Universo, y en particular sobre la teoría de la Inflación. En primer lugar enseñamos cómo se podría medir la escala energética de la Inflación mediante la medida de una específica señal de no-Gaussianidad primordial, llamada “graviton exchange”. Esta no-Gaussianidad está generada por la interacción de dos campos escalares con un gravitón y depende directamente del parámetro *tensor-to-scalar ratio* r , lo cual, a cambio, está directamente relacionado con la energía de la Inflación en los modelos de campo escalar cuya energía cinética es muy pequeña en comparación con su energía potencial. En el trabajo se enseña cómo esta señal primordial resulta ser del mismo orden de magnitud de la función a tres puntos a escalas grandes, planteando una posibilidad de detección. Además se utilizan los agujeros negros primordiales para poner límites en la amplitud máxima que puede tener el espectro de potencia de la curvatura primordial. Más específicamente, se ha desarrollado un procedimiento que conecta las simulaciones numéricas de formación de agujeros negros primordiales a una correcta interpretación cosmológica de esas simulaciones, hasta el cálculo de la abundancia de estos agujeros negros primordiales utilizando la teoría de picos. Este desarrollo teórico permitió obtener límites significativamente más robustos respecto a la literatura anterior.

Tesis disponible en:

<https://www.tdx.cat/handle/10803/668752#page=1>

Una aproximación numérica de la formación de estrellas masivas

Autor: Raphaël Mignon-Risse

(raphael.mignon-risse@apc.in2p3.fr)

Tesis doctoral dirigida por: Matthias González

Centro: Laboratorio AIM (Astrofísica, Instrumentación, Modelización) Universidad de París

Fecha de lectura: 21 de septiembre de 2020

Entender la formación de estrellas de baja y gran masa es un reto fundamental de la astronomía moderna. Se forman a partir del colapso de núcleos gravitacionalmente inestables, en el medio interestelar, cuya modelización no resulta sencilla: las energías gravitacionales, turbulencias, campos magnéticos, radiación y rayos cósmicos están cerca de la equipartición. Por lo tanto, las simulaciones numéricas son de gran ayuda para el estudio de la formación de estrellas. En este trabajo nos hemos centrado en la formación de estrellas masivas, de gran luminosidad, que emiten una elevada fuerza de radiación lo que, a simple vista unidimensional, puede impedir la acreción de material. Las simulaciones multidimensionales y el tratamiento particular de la radiación estelar son dos ingredientes clave. En este sentido, la principal labor de esta tesis ha sido el acoplamiento numérico entre dos métodos de transporte radiativo. Con esta nueva herramienta nos hemos centrado en tres ejes: los mecanismos de acreción, de eyección y la formación de múltiples sistemas estelares.

El núcleo de esta tesis ha sido el acoplamiento numérico entre dos métodos de transporte radiativo en el código RAMSES (Teyssier, 2002) y su validación a través de pruebas referentes de transporte. Seguidamente, hemos aplicado este método en un contexto de hidrodinámica radiativa de un colapso de núcleo preestelar masivo. Hemos demostrado que la fuerza de radiación mejora, con respecto a los métodos empleados previamente, terminando con la formación de cavidades radiativas mayores y de acreción menor. Lo más importante es que hemos probado la presencia y acreción a través de inestabilidades radiativas Rayleigh-Taylor en el borde de estas cavidades, cuya existencia era un debate activo en la comunidad. Hemos demostrado que su ausencia en nuestras simulaciones tiene un origen físico, no numérico.

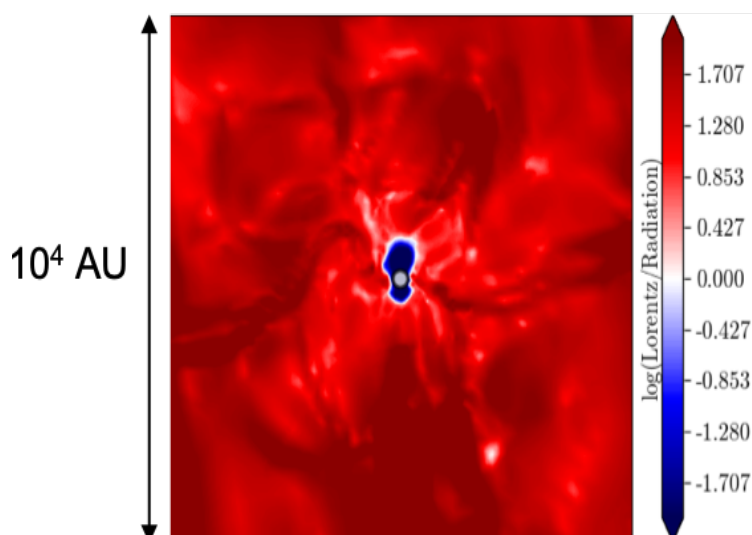
En un proyecto en curso efectuado con la colaboración de A. Oliva y R. Kuiper (Universidad de Tubinga, Alemania) hemos realizado un estudio comparativo de nuestros respectivos códigos en lo que concierne a la modelización de la fragmentación de discos de acreción y la subsiguiente formación de sistemas estelares múltiples. Mediante el uso de un plano cartesiano (en lugar de su plano esférico), nuestros resultados muestran la formación de un sistema binario o triple, mientras que ellos obtenían una única estrella. Cuando un sistema múltiple está suficientemente dominado en masa por un único objeto, nuestros códigos muestran una concordancia correcta en el perfil del disco de rotación y la estructura de temperatura.

Por último, hemos dirigido simulaciones originales de núcleos turbulentos magnéticos con difusión ambipolar y el recientemente implementado método híbrido de transporte radiativo. Hemos identificado la torre magnética como mecanismo de

flujo molecular dominante, salvo cuando se encuentra muy próximo a la protoestrella masiva, donde domina la fuerza de radiación. Hemos comparado las propiedades de estos flujos moleculares con los obtenidos de las muestras de observaciones estadísticas. Nuestros resultados tienden a mostrar una buena concordancia, dado que nuestras condiciones iniciales son representativas de los progenitores menos masivos de las estrellas de gran masa, y que la colimación no es intrínseca al flujo molecular, sino que también depende de factores ambientales. Por consiguiente, debe proseguirse la investigación de estas cuestiones. Hemos identificado a los discos de acreción como el único mecanismo de acreción, con tamaños de disco significativamente inferiores a lo predicho por las simulaciones de radiación hidrodinámica, lo que concuerda con los recientes resultados de formaciones de estrellas de baja masa. Asimismo, nos hemos preguntado acerca del área de alineación de los discos con los flujos y los campos magnéticos. Nuestros resultados son coherentes con un área de alineación de discos magnéticos arbitraria y un área de alineación de flujos ligeramente mejorada, siempre que el medio no sea demasiado turbulento.

Tesis (en inglés) próximamente disponible en: <http://theses.fr>

Fuerza de Lorentz vs. fuerza de radiación en un flujo protoestelar masivo. Su origen es fundamentalmente impulsado magnéticamente.



Interferometría en radio e infrarrojo de objetos estelares y subestelares

Autor: Juan Bautista Climent Oliver

(j.bautista.climent@uv.es)

Tesis doctoral dirigida por:

José Carlos Guirado Puerta

Centro: Universidad de Valencia

Fecha de lectura: 24 de septiembre de 2020

En esta tesis doctoral hemos usado la interferometría a modo de navaja suiza, lo cual nos ha permitido hacer contribuciones relevantes a diversos campos donde una gran resolución angular proporciona una gran ventaja.

El primer objeto que hemos investigado es el sistema triple subestelar VHS 1256-1257. Este sistema es relativamente joven (150-300 millones de años) y se encuentra próximo a nosotros (12,7-17,1 pc). Está compuesto por una binaria con separación de 0,1 arcsec cuyas componentes son dos objetos de tipo espectral M7.5. A 8 arcsec de esta, se encuentra un objeto muy frío con tipo espectral L7. Observamos este sistema usando el VLA (Very Large Array) a 8,4 GHz y 1,4 GHz. Además, también hicimos uso del EVN (European VLBI Network) a 1,4 GHz durante tres épocas diferentes. Gracias a estas observaciones descubrimos por primera vez radio emisión a 8,4 GHz proveniente de la binaria central VHS 1256-1257 AB. Además, pudimos estimar un índice espectral de acuerdo con un origen no térmico, sincrotrón o girsincrotrón. La falta de detección a 1,4 GHz nos llevó a formular la hipótesis de "auto-absorción", según la cual nuestros datos implicarían campos magnéticos muy fuertes en VHS 1256-1257 AB, con intensidades $\sim$ kG (ver figura, panel a). Finalmente, observaciones con el VLA a 26-40 GHz muestran una clara detección coincidente con la posición esperada para la binaria central. El flujo medido parece estar muy por encima del predicho por un modelo de disco de escombros, hipótesis que además no encaja con las no detecciones de observaciones de ALMA banda 7 (275-373 GHz) y NOEMA.

El siguiente objeto que hemos estudiado es AB Dor C, catalogado con tipo espectral M8 y situado a 15 pc. El estudio de la naturaleza de este objeto es especialmente relevante debido a que los modelos teóricos de evolución estelar muestran ciertas dificultades a la hora de predecir características físicas de objetos de baja masa en presecuencia principal. Solamente aquellos objetos bien conocidos y con masas debidamente determinadas pueden ser utilizados para comprobar las predicciones de estos modelos teóricos. AB Dor C es un candidato ideal para ser uno de estos objetos. Sin embargo, existe la hipótesis de que este objeto en realidad es binario. Nuestras observaciones con el instrumento AMBER en el VLTI revelaron que tanto las visibilidades como las clausuras de fase son compatibles con una binaria con cociente de flujo de un 5% (a 2,2 micrómetros) y con una separación de 38 mas (ver figura, panel b). Según los modelos, esto implicaría que AB Dor C estaría formado por una enana marrón cerca del límite de la quema de hidrógeno y por un objeto que se encontraría en la frontera entre las enanas marrones y los exoplanetas. Además comprobamos que esta binariedad aliviaría el desacuerdo visto entre las magnitudes observacionales y las predichas por las relaciones teóricas masa-luminosidad.

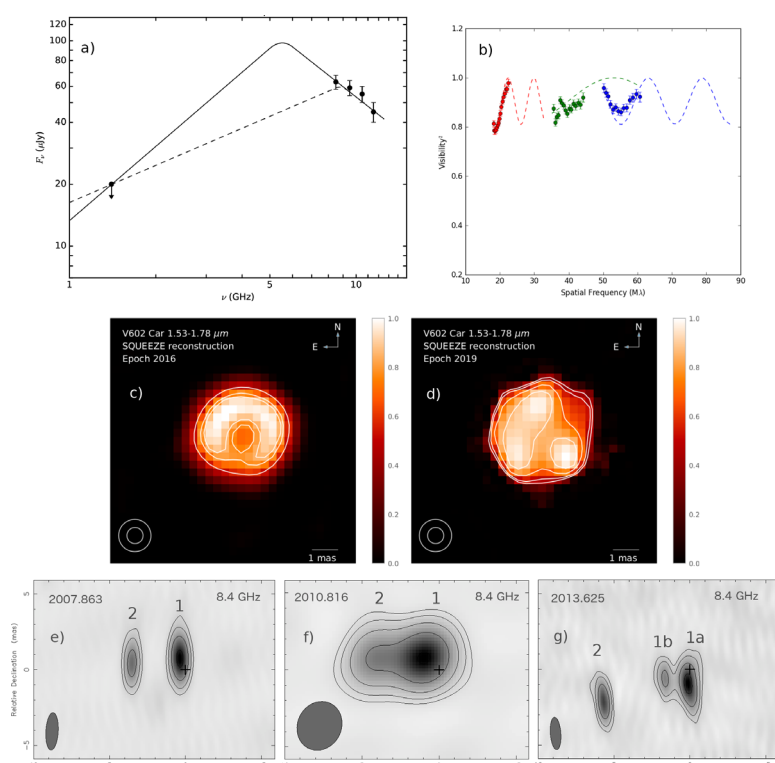
La tercera aportación de nuestro trabajo ha sido al campo de las estrellas supergigantes rojas (RSGs). Durante su vida, las RSGs pierden gran cantidad de masa. Sin embargo, los mecanismos físicos que contribuyen y dominan esta gran pérdida

son un misterio para la comunidad científica actual. Para arrojar algo de luz sobre los posibles mecanismos y sabiendo que la convección en la fotosfera estelar puede ser un factor crucial a la hora de levantar las capas más externas de la atmósfera de una RSG, observamos la supergigante roja V602 Carinae (V602 Car) con el instrumento PIONIER en el VLTI. Nuestro estudio muestra que las simulaciones predicen correctamente las subestructuras vistas en la superficie de V602 Car en dos épocas diferentes (ver figura, paneles c y d). Sin embargo, no consiguen reproducir las visibilidades y, por tanto, necesitamos la presencia de una componente molecular extendida. Concluimos así que la convección solamente puede que no sea el único proceso relevante a la hora de hacer levantar las atmósferas de las RSGs.

La última aportación se centra en AB Dor A, con tipo espectral K0 y una rotación muy rápida. Solamente en un número limitado de objetos las observaciones de VLBI han conseguido resolver la emisión estelar en radiofrecuencias. Hemos observado este sistema usando el LBA (Australian Long Baseline Array) a 1,4 GHz, 8,4 GHz y 22,3 GHz a lo largo de más de una década. Nuestras imágenes a 8,4 GHz muestran una morfología *double core-halo*, similar en las tres épocas observadas a esta frecuencia, y con la emisión extendiéndose a alturas entre 5 y 18 radios estelares (ver figura, paneles e, f y g). Lo que resulta todavía más intrigante es que, en estas imágenes, existe una clara variación temporal de la estructura de la fuente durante el tiempo de observación. Hemos considerado varios modelos que tratan de explicar las características observadas en nuestros mapas, pero nuestras observaciones actuales solamente nos permiten descartar la presencia de una compañera. AB Dor A es, en consecuencia, uno de los pocos objetos donde hemos podido resolver la emisión estelar con un resultado intrigante que necesitará de futuras observaciones.

Tesis disponible en: <https://roderic.uv.es/handle/10550/75452>

a) Espectro de VHS 1256-1257 AB a partir de las observaciones del VLA. b) Visibilidades de AB Dor C observadas por AMBER. Colores diferentes representan diferentes líneas de base. Los datos observacionales (círculos) ajustan a un sistema binario (líneas discontinuas). c) y d) Reconstrucción de la superficie de V602Car en épocas diferentes. e), f) y g) Imágenes de AB Dor A obtenidas con el LBA mostrando la estructura intrínseca de la fuente.



Subestructura en el espacio de fase de la Galaxia con *Gaia*

Autor: Pau Ramos

Tesis doctoral dirigida por: Teresa Antoja

Centro: Institut de Ciències del Cosmos,
Universitat de Barcelona

Fecha de lectura: 25 de septiembre de 2020

En esta tesis hemos explorado y caracterizado en detalle la subestructura cinemática de nuestra Galaxia, la Vía Láctea (VL), mediante la explotación del segundo catálogo de datos del satélite *Gaia* publicado en abril de 2018. Este catálogo nos ha permitido, por primera vez en la historia, acceder a las posiciones, velocidades, distancias y fotometría de más de mil millones de estrellas de la VL. Todo ello medido con la precisión necesaria para acceder a un nuevo nivel de detalle nunca visto y así, tal y como demostramos en este trabajo, avanzar en la comprensión de nuestra Galaxia.

La mera existencia de subestructura cinemática demuestra que nuestra Galaxia está viva. Cualquier acumulación significativa de estrellas en torno a un cierto tipo de órbitas se puede asociar con un evento pasado que todavía hoy perdura a pesar de la rotación diferencial, o bien, con los efectos persistentes en el tiempo de un elemento no axisimétrico como la barra Galáctica. Esto abarca desde cúmulos (abiertos o globulares), galaxias satélites, sistemas en proceso de evaporación y corrientes estelares, así como procesos dinámicos a gran escala tales como las resonancias con la barra o los mismos brazos espirales.

Así pues, hemos explorado el espacio de fases (posiciones y velocidades) completo de seis millones de estrellas del disco Galáctico de forma sistemática y robusta más allá de la vecindad Solar. Con ello hemos revelado de forma clara la existencia de estructuras cinemáticas con distintas morfologías conviviendo en el plano de velocidades, algunas de ellas con forma de arco de energía constante. Al seguir los cambios en morfología y velocidades de estas estructuras a lo largo y ancho de la VL hemos descubierto que no todas presentan los mismos gradientes: algunas tienden a preservar el momento angular mientras que otras la energía. Gracias a estos resultados nos ha sido posible proponer por primera vez una distinción entre las estructuras causadas por la barra y aquellas causadas por perturbaciones externas.

A continuación, con el fin de analizar los más de 700 millones de estrellas lejanas que hay en el catálogo de *Gaia*, diseñamos una

estrategia que nos permitiese utilizar una metodología similar a la usada en el disco para la búsqueda de subestructura, pero ahora trasladada de forma eficiente al halo y los confines de la Galaxia. Nuestro método pionero en el uso masivo y paralelizable del archivo *Gaia* (gea.esac.esa.int/archive) nos ha permitido detectar de forma simultánea un gran número de cúmulos globulares, galaxias enanas, así como otros satélites de la VL como las nubes de Magallanes e incluso *ultra faint dwarf galaxies*. Adicionalmente, hemos podido detectar también varias estructuras extendidas en el cielo, las cuales hemos estudiado en detalle en esta tesis por su gran relevancia dentro de la historia de la VL.

Dos de estas estructuras extensas son el Anticentre Stream (ACS, por sus siglas en inglés) y Monoceros, las cuales hemos aislado y caracterizado a un nivel de detalle sin precedentes. Ambas son estructuras situadas en el anticentro galáctico, inesperadas tanto por su densidad como por su color y su ubicación relativa al disco (respectivamente, a $\sim 6,5$ kpc y $\sim 4,5$ kpc del plano). Gracias a nuestro estudio de su morfología y poblaciones estelares, concluimos que antaño las estrellas que ahora forman ACS y Monoceros eran parte del disco, que sin embargo fueron "levantadas" por la prolongada interacción gravitatoria con la galaxia enana de Sagitario.

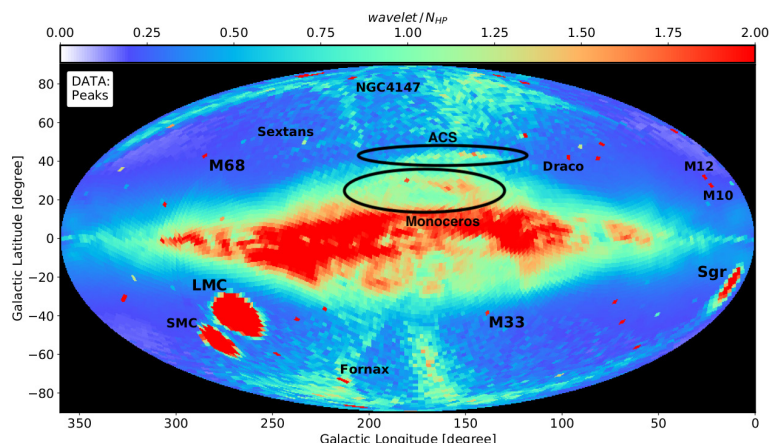
Nuestros datos también nos han permitido elaborar dos muestras distintas de, precisamente, la corriente estelar de Sagitario. Esto ha dado lugar a la primera determinación empírica precisa de los movimientos propios a lo largo de todo el corriente estelar, así como de su dispersión de velocidades gracias a la combinación de distancias y movimientos propios. Como resultado de la tesis, demostramos que los datos de la galaxia de Sagitario no son consistentes con los modelos actuales, requiriéndose otros elementos como las nubes de Magallanes para explicar las observaciones.

Este tipo de estudios no habían sido posibles hasta ahora por la falta de catálogos de todo el cielo y con la suficiente estadística. Esta tesis ha sido pionera tanto por su metodología como por su enfoque, tratando de unificar tres aspectos de nuestra Galaxia generalmente tratados como independientes pero que ahora los resultados nos obligan a interpretar como una sola pieza de la historia reciente de la VL: la subestructura en el disco, las estructuras del anticentro Galáctico y la corriente estelar de Sagitario.

Con este trabajo, se ha evidenciado la necesidad de avanzar en el modelaje dinámico de la Galaxia para poder tratar rigurosamente el acoplamiento entre distintos mecanismos dinámicos y desarrollar un marco teórico que nos permita reconstruir la evolución del potencial gravitatorio y la historia reciente de nuestra Galaxia a partir de nuestros resultados.

Tesis disponible en: <https://www.tdx.cat/handle/10803/670916>

Proyección Mollweide en coordenadas galácticas de la intensidad relativa de nuestras detecciones cinemáticas en el halo y los confines de la VL. Solo se muestra la estructura que domina el espacio cinemático a cada HEALpix del cielo. Con ello, podemos aislar decenas de cúmulos globulares, galaxias satélites, la corriente estelar de Sagitario y, en el centro de la figura, ACS y Monoceros.



Censo de estrellas Herbig Ae/Be: nuevos candidatos y análisis desde la perspectiva de *Gaia*

Autor: Miguel Vioque (miguel.vioque@alma.cl)

Tesis doctoral dirigida por:

René D. Oudmaijer, Ricardo Pérez-Martínez y Deborah Baines

Centro: University of Leeds/Isdefe-European Space Astronomy Centre (ESAC)

Fecha de lectura: 19 de octubre de 2020

Las estrellas presecuencia principal Herbig Ae/Be, canónicamente definidas como aquellas con masas $2M_{\odot} \leq M \leq 10M_{\odot}$, son cruciales para entender las diferencias entre los mecanismos de formación estelar de alta y baja masa. Históricamente, el estudio de las propiedades generales de estas estrellas ha estado obstaculizado por la falta de una muestra homogénea y bien definida. Muy pocas estrellas Herbig Ae/Be eran conocidas y estas habían sido mayormente descubiertas de forma azarosa. Como consecuencia, muchos de los estudios que tratan la formación estelar de alta masa sufren de importantes sesgos y falta de completitud.

En esta tesis hemos estudiado las propiedades generales de las 252 estrellas Herbig Ae/Be con paralajes en *Gaia* DR2 que eran conocidas o que habían sido propuestas al comienzo de esta tesis doctoral (Vioque et al. 2018, A&A, 620, A128). Encontramos que las estrellas más masivas de esta muestra tienen un exceso infrarrojo y una variabilidad óptica mucho menor que sus homólogas de menor masa, estando el límite entre ambos grupos alrededor de $7M_{\odot}$. Para explicar esta diferencia se propone la existencia de diferentes mecanismos de dispersión de discos (principalmente de dispersión de polvo), o mecanismos que actúen de forma diferente en cada intervalo de masas. El indicador de variabilidad fotométrica desarrollado en este trabajo muestra que aproximadamente el 25% de todas las estrellas Herbig Ae/Be son fuertemente variables en el óptico. Proporcionamos evidencia de que esta variabilidad es en la mayoría de casos debida a estructuras asimétricas del disco protoplanetario visto de costado.

Usando esta muestra bien caracterizada de estrellas Herbig Ae/Be como conjunto de entrenamiento, hemos construido un catálogo homogéneo y bien definido con 8470 nuevas estrellas presecuencia principal. Para lograr este fin hemos usado un algoritmo *machine learning* expresamente diseñado para este propósito. Al menos 1361 de estas estrellas son potencialmente nuevas candidatas a estrella Herbig Ae/Be dadas sus posiciones en el diagrama de Hertzsprung-Russell. Esto aumenta el número de objetos conocidos de la clase en un orden de magnitud (Vioque et al. 2020, A&A, 638, A21). Las técnicas estándares no son eficaces identificando estrellas Herbig Ae/Be por su similitud con las estrellas Be clásicas, con las cuales comparten muchas características. Al centrarnos en separar eficazmente estos dos tipos de fuentes, nuestro algoritmo también ha producido un catálogo de 693 nuevas candidatas a estrella Be clásicas.

Por último, discutimos los resultados de observaciones espectroscópicas independientes realizadas para una fracción de los nuevos catálogos. Un total de 120 nuevas estrellas Herbig Ae/Be y 14 nuevas estrellas Be clásicas fue observado. Estas observaciones independientes confirman aún más la calidad y precisión de la categorización realizada en esta tesis (ver figura). Este trabajo concluye con un análisis general de las propiedades de los nuevos catálogos que valida los resultados y las conclusiones obtenidas para el conjunto de estrellas Herbig Ae/Be previamente conocidas.

Tesis disponible en: <http://etheses.whiterose.ac.uk/27872/>

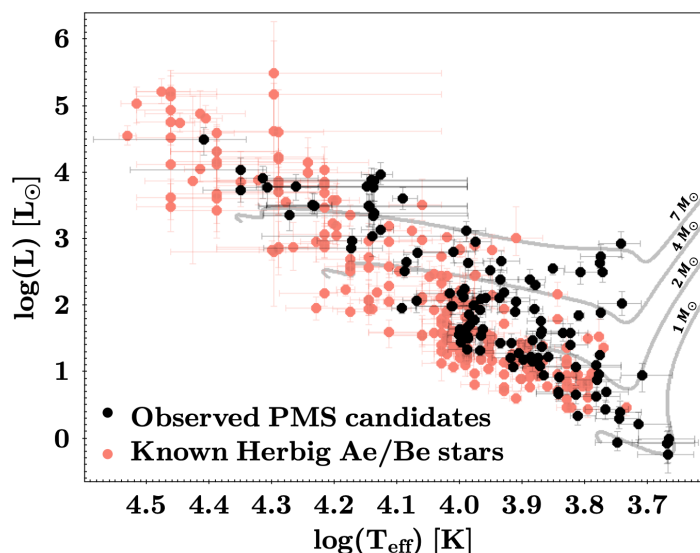


Diagrama de Hertzsprung-Russell. En rojo se muestran las estrellas Herbig Ae/Be conocidas al principio de esta tesis doctoral con una buena solución astrométrica en *Gaia* DR2 (218). En negro se muestran las nuevas estrellas Herbig Ae/Be identificadas espectroscópicamente en esta tesis (120 de los 145 candidatos observados del catálogo general que contiene 8470 fuentes). Nótese la distribución similar en masa, temperatura y luminosidad entre ambos grupos. Las trazas evolutivas de 1, 2, 4 y $7M_{\odot}$ fueron tomadas de Marigo et al. (2017, ApJ, 835, 77).

Formación y evolución de cúmulos globulares en un entorno cosmológico

Autora: Marta Reina-Campos

Tesis doctoral dirigida por:

J. M. Diederik Kruijssen

Centro: Astronomisches Rechen-Institut
- Zentrum fuer Astronomie, Ruprecht-Karls-
Universitaet of Heidelberg

Fecha de lectura: 22 de octubre de 2020

Los cúmulos estelares son grupos de estrellas ligadas gravitacionalmente y pueden ser encontrados en una gran variedad de entornos galácticos. Se observan tanto cúmulos jóvenes que se están formando en los discos gaseosos de las galaxias Antena, como poblaciones de cúmulos globulares viejos que, en la Vía Láctea, se encuentran preferentemente en el halo estelar. Esto nos sugiere que la evolución de estos objetos tan curiosos puede estar ligada a la evolución de su galaxia anfitriona.

Esta tesis explora la formación y evolución de cúmulos estelares en un entorno cosmológico. Para ello, primero desarrollamos modelos analíticos que describen cómo el entorno galáctico es capaz de moldear la demografía de estos objetos. El primer modelo permite determinar la masa máxima en la formación de un cúmulo estelar, partiendo de una galaxia en equilibrio hidrostático con rotación diferencial. En este modelo encontramos que, para poder reproducir los datos observacionales, resulta crucial incluir la posible destrucción de la nube de gas debido al feedback estelar. El segundo modelo que exploramos describe la cantidad de masa perdida por un cúmulo debido a choques de marea con grandes nubes de gas. Para ello, por primera vez tenemos en cuenta que choques sucesivos desde un mismo eje alinean las velocidades de las estrellas, y esto facilita que los cúmulos pierdan masa

más rápido que si los choques son aleatorios.

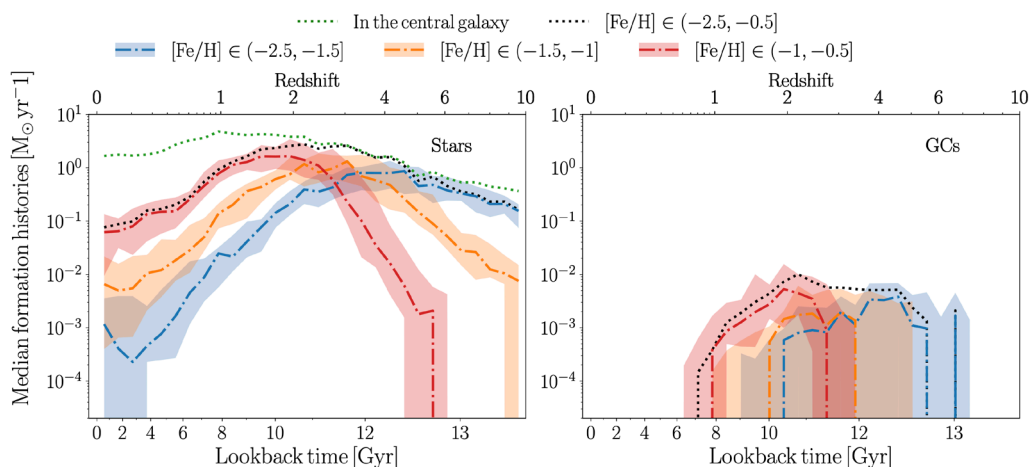
En la segunda parte de esta tesis usamos un conjunto de simulaciones cosmológicas e hidrodinámicas del proyecto E-MOSAICS para estudiar en detalle la formación y evolución de estos objetos a la par que se forman y evolucionan sus galaxias anfitrionas. Con estas simulaciones, que representan galaxias con masas parecidas a la Vía Láctea, podemos estudiar cuándo se forman los cúmulos estelares y cuánta masa pierden durante casi 14 giga años de evolución. Los cúmulos globulares presentes en estas simulaciones se formaron principalmente hace entre 8 y 13 giga años, con los objetos con menor cantidad de metales formándose primero. Además, encontramos que los cúmulos más grandes eran solo dos y cinco veces más masivos en el momento en el que se formaron que actualmente. Esto impone restricciones a modelos teóricos que intentan explicar el origen de las diferentes poblaciones estelares que han sido observadas de manera ubicua en multitud de cúmulos globulares. Por último, usamos estas simulaciones también para estimar la contribución de la masa de cúmulos estelares al crecimiento de halos estelares.

Finalmente, en la tercera parte de esta tesis describimos los modelos numéricos incluidos en el proyecto EMP-Pathfinder. Este representa la nueva generación de simulaciones cosmológicas capaces de seguir la coformación y evolución de galaxias con sus poblaciones de cúmulos estelares en un entorno cósmico, a la par que describe la componente fría y densa del gas interestelar. Incluir esta componente del gas es esencial para poder modelar las nubes frías y densas donde se forman los cúmulos más masivos, y que dominan la evolución de los cúmulos debido a los choques de marea que generan.

De todos estos estudios se desprende que los cúmulos estelares están estrechamente ligados a sus entornos cósmicos, lo que implica que es necesario describir en detalle casi 14 giga años de evolución para entender las poblaciones de cúmulos que se pueden observar en el Universo Local.

Tesis disponible en: <https://katalog.ub.uni-heidelberg.de/>

Historia de formación estelar promedio (izquierda) e historia de formación de cúmulos globulares promedio (derecha) usando diferentes cortes en metalicidad en las 25 simulaciones cosmológicas del proyecto E-MOSAICS (Reina-Campos et al. 2019). Los cúmulos globulares se forman principalmente hace entre 8 y 13 giga años, con los objetos con menor cantidad de metales formándose primero.



Acerca del origen de la contaminación por metales en las atmósferas de enanas blancas

Autor: Raúl Felipe Maldonado Sánchez

Tesis doctoral dirigida por: Miguel Chávez,

Eva Villaver y Emanuele Bertone

Centro: Instituto Nacional de Astrofísica,

Óptica y Electrónica

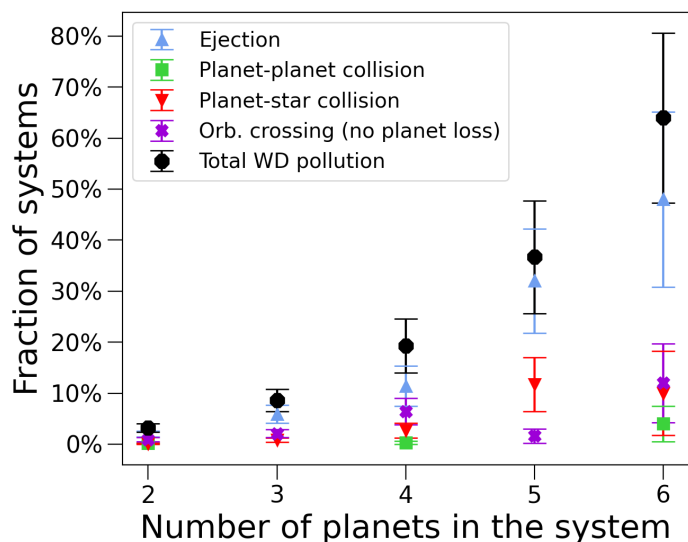
Fecha de lectura: 9 de diciembre de 2020

Esta tesis tiene el objetivo de entender el origen de la contaminación atmosférica por metales observada en el 25-50% de enanas blancas. Debido a que diversas evidencias observacionales respaldan la acreción de cuerpos rocosos como el mecanismo más aceptado para explicar este fenómeno y sabiendo que la evolución estelar naturalmente previene la existencia de material a pocos radios solares de la enana blanca, el paradigma actual involucra a los planetas que sobreviven la evolución de la estrella central y los cuerpos dispersados a órbitas cercanas de la enana blanca como los responsables de producir la contaminación atmosférica en la enana blanca. Tomando en cuenta la hipótesis de que los planetas sobreviven las diferentes etapas evolutivas de su estrella central orbitando a distancias lejanas y que la interacción dinámica entre ellos produce procesos de dispersión planeta-planeta que mandan cuerpos a las proximidades de la enana blanca, en donde las fuerzas de marea de la estrella pueden destruirlos y así aumentar la probabilidad de que los escombros caigan a la atmósfera estelar, en esta tesis se simulan 5830 sistemas planetarios con dos y más planetas, cuyas arquitecturas orbitales se basan en los cientos de sistemas planetarios de múltiples planetas detectados orbitando estrellas de secuencia principal, escalados de una forma que su dinámica original se mantiene. Con este procedimiento restringimos y al mismo tiempo expandimos el espacio de parámetros físico y orbital de las configuraciones planetarias respecto a trabajos previos en la misma línea de investigación. Esta es la primera vez que se realizan simulaciones dinámicas restringidas por parámetros derivados de los sistemas observados. Las simulaciones dinámicas se han realizado mediante el uso de una versión actualizada del paquete de N-cuerpos MERCURY, que toma en cuenta los cambios de masa y radio de la estrella central en las diferentes etapas de la evolución estelar. Cada

sistema se ha simulado desde la secuencia principal hasta la fase de enana blanca por 10 Gyr.

Como resultado principal, hemos encontrado que el 3,2% y 8,6% de simulaciones dinámicamente activas (con pérdidas de planetas, cruce de órbitas y/o dispersión orbital) en la fase de enana blanca con dos y tres planetas, respectivamente, no pueden reproducir el 25-50% de enanas blancas contaminadas por metales. Sin embargo, la fracción de sistemas inestables con cuatro, cinco y seis planetas (19,2%, 36,7% y 64%, respectivamente) sí reproduce la prevalencia observada de enanas blancas contaminadas. Por lo tanto, a mayor multiplicidad planetaria, mayor es la probabilidad de tener una inestabilidad dinámica capaz de lanzar planetas o planetesimales a distancias de pocos radios solares de la enana blanca (ver figura). También encontramos que sistemas con alta multiplicidad de planetas producen eventos de dispersión planeta-planeta que lanzan un número no despreciable de planetas (en el rango de masas de súpertierra a Saturno) a distancias ≤ 10 radios Roche o incluso cruzan el radio de Roche de la enana blanca hasta que algunos de ellos colisionan con la superficie estelar. La alta multiplicidad de planetas explica naturalmente la existencia de planetas con órbitas muy cercanas a la enana blanca, como el planeta joviano recientemente descubierto WD 1856 b, que tiene una órbita de 1,4 días, sin la necesidad de invocar mecanismos adicionales, tales como el von Zeipel-Lidov-Kozai o la fase de envoltente común. Entre otros resultados, tenemos que las inestabilidades dinámicas, tales como pérdidas planetarias o cruce de órbitas en los sistemas con múltiples planetas, ocurren en mayor número durante el primer Gyr del tiempo de enfriamiento de la enana blanca, y este número decrece a medida que la enana blanca envejece. Además, encontramos que simulaciones teniendo al menos un planeta gigante ($M > 100 M_{\oplus}$) tienden a desestabilizarse más rápido que las simulaciones con planetas más pequeños ($M \leq 100 M_{\oplus}$), las cuales presentan inestabilidades dinámicas en escalas de Gyr. Finalmente, obtenemos que la mayoría de las simulaciones inestables en la fase de enana blanca pierden planetas mediante eyecciones planetarias. Sin embargo, en sistemas con alta multiplicidad planetaria, los planetas remanentes en el sistema permanecen dinámicamente activos, aún después de la eyección planetaria, produciendo múltiples cruces de órbitas y dispersión orbital, eventos dinámicos capaces de desestabilizar cuerpos menores como planetesimales presentes en el sistema.

Los resultados derivados de esta tesis han sido publicados en tres artículos arbitrados (Maldonado et al., 2020a, MNRAS, 497, 4091; Maldonado et al., 2020b, MNRAS, 499, 1854; Maldonado et al., 2021, MNRAS, 501, L43).



Número relativo de sistemas con múltiples planetas con respecto al número total de simulaciones que pierden planetas por inestabilidades dinámicas así como simulaciones con cruce de órbitas que no pierden ningún planeta durante 10 Gyr. Además, presentamos el número total de simulaciones que pueden contribuir a la contaminación de enanas blancas. Las barras de error corresponden a la desviación estándar del método de resampling Bootstrap. Cada tipo de inestabilidad es marcada con diferente símbolo y color (Maldonado et al. 2021).

Actividad estelar y exoplanetas de enanas M con espectroscopía en el visible y el infrarrojo cercano de CARMENES

Autora: Marina Lafarga Magro (lafarga@ice.cat)

Tesis doctoral dirigida por: Ignasi Ribas Canudas

Centro: IUniversitat Autònoma de Barcelona,

Institut de Ciències de l'Espai (CSIC, IEEC)

Fecha de lectura: 10 de diciembre de 2020

Después del descubrimiento de los primeros exoplanetas hace unas tres décadas, la detección y caracterización de compañeros planetarios se ha convertido en un tema de investigación prominente, especialmente la búsqueda de planetas parecidos a la Tierra, cuerpos rocosos que orbitan en la zona habitable (HZ) de sus estrellas huéspedes. Uno de los principales métodos utilizados para encontrar y caracterizar exoplanetas es la técnica de la espectroscopía Doppler o velocidad radial (RV), basada en el uso de espectros estelares para medir cambios periódicos en la RV de una estrella causados por la atracción gravitatoria de un exoplaneta en órbita.

Actualmente, la variabilidad intrínseca de las estrellas huéspedes es el principal reto en el estudio de exoplanetas. Las estrellas no son cuerpos invariables ni homogéneos, sino que presentan variabilidad en distintas escalas de tiempo. La más relevante es la actividad magnética estelar, que incluye fenómenos como manchas o fáculas que aparecen en la superficie de la estrella y están moduladas por su rotación. Estos fenómenos distorsionan los espectros estelares, introduciendo sesgos en las RVs suficientemente grandes como para esconder o hasta imitar la señal causada por un planeta. Por lo tanto, para continuar detectando y estudiando exoplanetas de baja masa, una mejor comprensión de estos fenómenos estelares y sus efectos en nuestras observaciones es clave.

Esta tesis se centra en el estudio de los efectos de la actividad estelar en observaciones espectroscópicas de estrellas frías obtenidas con el instrumento CARMENES. CARMENES es un espectrógrafo de alta resolución capaz de observar en el rango de longitudes de onda visible e infrarrojo cercano. Está

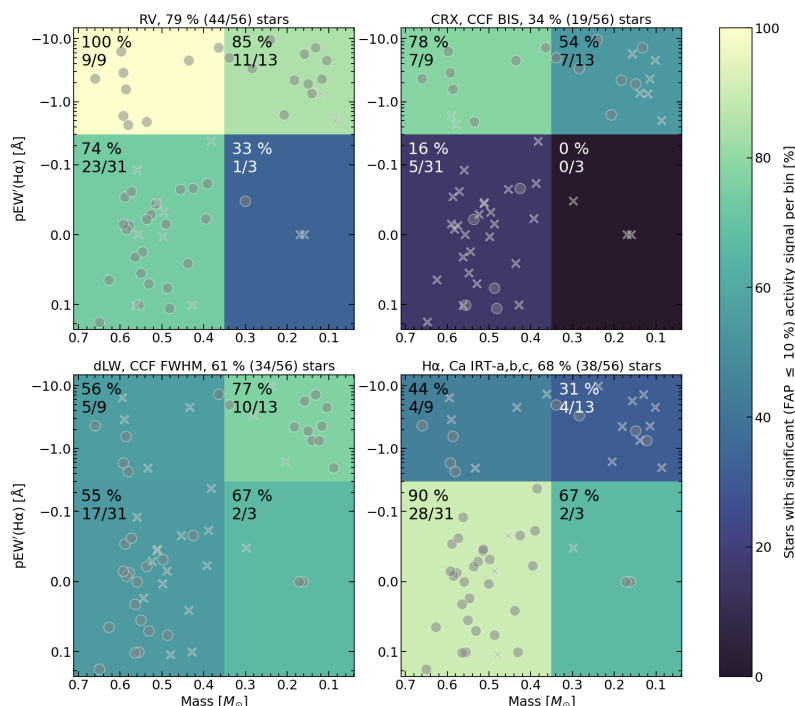
Número de estrellas que muestran señal de actividad en distintos indicadores espectroscópicos: velocidades radiales (RV, panel superior izquierda), indicadores relacionados con la variación de RV con la longitud de onda (CRX, CCF BIS, panel superior derecha), indicadores relacionados con el cambio de anchura de las líneas fotosféricas (dLW, CCF FWHM, panel inferior izquierda) e indicadores cromosféricos (H α , Ca IRT, panel inferior derecha). Cada panel muestra el nivel de actividad medio de las estrellas (medido a partir de su pEW/H α , eje y, de menos a más activas) en función de su masa (eje x, de mayor a menor masa). Las estrellas están divididas en cuatro grupos, dependiendo de su nivel de actividad medio y masa. Los colores de cada grupo indican el número de estrellas (en porcentaje) que muestran una señal periódica significativa (FAP menor o igual a 10 %) relacionada con la actividad estelar. Los números de cada grupo muestran este porcentaje, junto con el número absoluto de estrellas con detección de actividad. El título de cada panel muestra los mismos números, pero para todas las estrellas de la muestra. Los puntos grises indican la posición de las estrellas de la muestra en función de su nivel de actividad medio y su masa (los círculos indican las estrellas para las cuales detectamos alguna señal de actividad y las cruces, las que no muestran ninguna señal)..

realizando un estudio de más de 300 enanas M, las estrellas con menor masa de la secuencia principal, con el objetivo primordial de detectar exoplanetas pequeños.

En primer lugar, hemos desarrollado un código que implementa el método de la función de correlación cruzada (CCF) para medir RVs e indicadores de actividad estelar en observaciones de alta resolución, y lo hemos aplicado a los datos de CARMENES. Este método usa máscaras binarias ponderadas, un *template* estelar simplificado construido seleccionando líneas espectrales. Hemos creado varias máscaras en función del subtipo espectral y de la velocidad de rotación de la estrella a analizar.

A continuación, hemos utilizado los indicadores de actividad derivados de la CCF, junto con otros indicadores de actividad espectroscópicos, para analizar sus variaciones temporales en una muestra de casi cien enanas M de varias masas y niveles de actividad. Aproximadamente la mitad de las estrellas analizadas muestran RVs con señales de actividad claros. Nuestros resultados muestran que distintos indicadores son sensibles a la actividad de forma diferente según las características de la estrella: indicadores cromosféricos son más útiles para estrellas de baja actividad, indicadores relacionados con el cambio de RV con la longitud de onda funcionan mejor para estrellas más activas, y otros indicadores relacionados con el cambio de anchura de las líneas fotosféricas proporcionan resultados similares en todo tipo de estrellas, pero son especialmente útiles para las más activas y de menor masa (ver figura).

Finalmente, hemos analizado los efectos de la actividad sobre líneas de absorción individuales presentes en el espectro de estrellas activas. Estudiando las correlaciones entre las RVs de las líneas individuales y los indicadores de actividad, podemos clasificar las líneas observadas según su sensibilidad a la actividad. Esto nos permite seleccionar líneas afectada de forma distinta por la actividad y usarlas para volver a calcular RVs. De esta forma obtenemos RVs para las cuales mitigamos o incrementamos el señal de actividad en diversos grados. También observamos que las misma líneas en distintas estrellas muestran diferente sensibilidad a la actividad.



COSMIC DANCE: un censo completo de regiones de formación estelar cercanas

Autora: Núria Miret Roig

(nuria.miret.roig@univie.ac.at)

Tesis doctoral dirigida por: Hervé Bouy

Centro: Universidad de Burdeos

Fecha de lectura: 17 de diciembre de 2020

Comprender cómo se forman las estrellas y los planetas es una de las cuestiones fundamentales en astronomía. Actualmente se sabe que la mayoría de las estrellas se forman en grupos y el principal mecanismo de formación es el colapso gravitatorio de cores protoestelares. Sin embargo, la formación de objetos subestelares, enanas marrones y planetas errantes (planetas no ligados gravitacionalmente a otro cuerpo celeste) es un importante tema de debate actualmente. Distintos mecanismos se han propuesto para explicar la formación de enanas marrones y planetas errantes, por ejemplo, colapso gravitatorio (parecido a las estrellas), eyección de discos (debido a inestabilidades dinámicas) y fotoevaporación (en la cercanía de estrellas muy masivas OB). Sin embargo, la contribución de cada uno de estos mecanismos aún no está establecida.

El objetivo principal de esta tesis es determinar la función de masa, es decir, la densidad de objetos en función de la masa, en distintas regiones para constreñir las teorías de formación estelar. Hemos usado los datos del catálogo *Gaia* DR2 junto con observaciones desde Tierra del proyecto COSMIC DANCE para buscar miembros con alta probabilidad de pertenencia a asociaciones y cúmulos jóvenes. Hemos estudiado el cúmulo IC4665 (30 Ma) y la región de Upper Scorpius (USC) y ρ Ophiuchi (ρ Oph; 1-10 Ma), donde hemos encontrado grandes poblaciones de objetos subestelares que exceden las predicciones de las teorías de colapso gravitatorio. En USC, donde la sensibilidad es superior, hemos podido estimar que la fracción de planetas errantes formados debido a la eyección de

sistemas planetarios es parecida a la fracción de planetas que se podrían haber formado debido al colapso gravitatorio.

La edad es un parámetro fundamental para estudiar la formación y evolución de las estrellas, así como para obtener masas precisas. En esta tesis, hemos actualizado y mejorado una estrategia para estudiar la edad dinámica de asociaciones jóvenes basada en el análisis de órbitas trazadas atrás en el tiempo asumiendo un potencial galáctico. Hemos determinado la edad de la asociación β Pictoris, $18,5 \pm 2,0$ Ma, resultado muy importante para los estudios de planetas y discos alrededor de miembros de la asociación. Esta herramienta está lista para ser aplicada en el futuro a otras regiones como USC y ρ Oph.

Los miembros que hemos encontrado en IC4665, USC y ρ Oph son excelentes candidatos para estudios de discos, exoplanetas, caracterización de enanas marrones y planetas errantes. En esta tesis, hemos presentado un método basado en el estudio de la fotometría infrarroja para identificar discos. Combinando los datos de WISE y *Spitzer*, hemos encontrado seis discos en IC4665 para ser estudiados con profundidad con ALMA o el JWST en el futuro. Las herramientas desarrolladas están listas para ser empleadas en otras regiones como USC y ρ Oph donde esperamos encontrar más discos y podremos estudiar la presencia de discos en enanas marrones y planetas errantes.

Tesis disponible en <http://www.theses.fr/2020BORD0327>

Función de masa de la región de USC y ρ Oph (1-10 Ma) comparada con los modelos analíticos de Chabrier (2005), Thies and Kroupa (2007) y Thies et al. (2015). Las líneas verticales punteadas indican la frontera entre (de izquierda a derecha) planetas, enanas marrones y estrellas, asumiendo una edad de 5 Ma. Las funciones están normalizadas en el rango de masa ($> 1 M_{\odot}$) donde todas tienen una pendiente de Salpeter. El pico de nuestra función de masa observacional está en $0,3-0,5 M_{\odot}$, parecido a la masa característica propuesta por modelos analíticos ($0,25 M_{\odot}$, Chabrier 2005). En el rango de masas subestelares, nuestra función de masa observacional tiene una pendiente compatible con los modelos que consideran varios mecanismos de formación (Thies and Kroupa 2007 y Thies et al. 2015) mientras que los modelos que únicamente consideran la formación mediante core-collapse (Chabrier 2005) subestiman la fracción de planetas errantes encontrados por nuestras observaciones. Nuestro resultado, por tanto, indica que los objetos subestelares no se forman únicamente mediante core-collapse sino que hay otros mecanismos en juego como la eyección de sistemas planetarios.

