

ESTRELLAS ENIGMÁTICAS Y DÓNDE ENCONTRARLAS: LA BÚSQUEDA DE ESTRELLAS SIMBIÓTICAS EN LA VÍA LÁCTEA

Daniel Felipe Mera-Valverde ^{a*}

^a Departamento de Astronomía, Universidad de Guanajuato, Callejón de Jalisco S/N, Col. Valenciana,
CP: 36023, Guanajuato, Gto, México.

df.meravalverde@ugto.mx

Resumen

Se presenta una revisión del fenómeno de las estrellas simbióticas, con énfasis en su evolución histórica, sus firmas espectrales características y su clasificación en sistemas *shell-burning* y *accreting-only*. Se discute el problema del censo galáctico, así como las limitaciones de los métodos actuales de identificación, incluidos los basados en aprendizaje automático. Finalmente, se destacan los aportes recientes del Departamento de Astronomía de la Universidad de Guanajuato en el desarrollo de herramientas para la detección de simbióticas del tipo *accreting-only*,

Palabras clave: estrellas simbióticas; sistemas binarios; espectroscopía estelar.

ENIGMATIC STARS AND WHERE TO FIND THEM: THE SEARCH FOR SYMBIOTIC STARS IN THE MILKY WAY

Abstract

A review of the phenomenon of symbiotic stars is presented, with emphasis on their historical evolution, their characteristic spectral signatures, and their classification into shell-burning and accreting-only systems. The problem of the galactic census is discussed, as well as the limitations of current identification methods, including those based on machine learning. Finally, recent contributions from the Department of Astronomy of the University of Guanajuato are highlighted, with emphasis on the development of tools to detect symbiotic stars of the accreting-only type.

Keywords: symbiotic stars, binary systems, stellar spectroscopy.

1. Introducción

Dentro del conocimiento que consideramos relativamente bien establecido sobre nuestra propia galaxia, destaca el hecho de que cerca del 85% de las estrellas en la Vía Láctea forman parte de sistemas binarios (Duchene y col. 2013). Lo anterior implica que, de las aproximadamente seis mil estrellas que podemos ver a simple vista en el cielo nocturno, más de cuatro mil no son cuerpos celestes solitarios, sino al menos 2 objetos orbitándose alrededor de su centro de gravedad. Esta realidad contrasta profundamente con la noción cotidiana que solemos tener sobre las estrellas, basada en la experiencia con nuestro Sol: una estrella solitaria que evoluciona de forma serena, con un comportamiento aparentemente estable, por lo menos en las escalas de tiempo humanas, y con una influencia determinante, pero sin un impacto catastrófico sobre su entorno planetario.

El avance del conocimiento astronómico y de las técnicas observacionales ha permitido revelar que el comportamiento de las estrellas binarias es casi idéntico al ejemplo que el Sol sugiere, pero solo cuando las componentes están suficientemente separadas para evolucionar independientemente bajo la

gentil interacción gravitatoria entre ellas. Sin embargo, cuando la distancia que las separa es comparable al diámetro de la estrella más grande, el escenario cambia radicalmente y las estrellas dejan de evolucionar de forma aislada, influyéndose mutuamente de forma profunda, dando paso a una evolución conjunta que se caracteriza principalmente por interacciones gravitacionales intensas y transferencia de masa con implicaciones no menores sobre su compañera.

En los sistemas binarios interactuantes, la transferencia de masa puede ocurrir de forma relativamente tranquila o por medio de procesos violentos y energéticos, dependiendo de varios factores como la separación, la tasa de acreción y las propias características de las estrellas involucradas. Estos sistemas presentan una gran diversidad de configuraciones, que pueden incluir estrellas con masas y estados evolutivos similares o muy distintos, hasta sistemas con objetos muy compactos como enanas blancas, estrellas de neutrones y agujeros negros.

Dentro de esta diversidad, las estrellas simbióticas (SySts) representan un tipo especialmente interesante de sistemas binarios interactuantes. Se componen por una gigante roja (RG), que es típicamente referida

como componente fría, y una enana blanca (WD) o una estrella de neutrones (NS), conocida como componente caliente del sistema (Mukai et al. 2016). Un hecho importante es que estas estrellas están interactuando por medio de la acreción de masa desde la componente fría hacia la componente caliente, transfiriendo material bajo mecanismos como el desbordamiento del lóbulo de Roche o por la captura de vientos estelares. Las SySts se caracterizan por tener períodos orbitales largos, con rangos entre uno y cuatro años, aunque también se han observado sistemas con períodos de unos cientos de días (Corradi et al. 2008; Munari 2019). En la Vía Láctea, estos sistemas se han encontrado sobre todo en el bulbo galáctico, una región que es rica en metales como el oxígeno. De esta forma las componentes frías de estos sistemas se relacionan comúnmente con tipos espectrales M, siendo los subtipos M5III y M7III los más comunes (Whitelock y Munari, 1992), aunque también se han reportado sistemas con componentes frías del tipo K y S gigantes (Merc, 2024).

Para comprender cómo hemos llegado a estas generalidades sobre el fenómeno simbiótico, resulta pertinente hacer una revisión breve de su desarrollo histórico, algunos fenómenos

físicos y sus particularidades observacionales. En esta revisión partiremos de las primeras observaciones que llamaron la atención de los astrónomos y pusieron de manifiesto su existencia, pasando por las interpretaciones iniciales sobre la desconcertante naturaleza de estos sistemas y la concepción que tenemos hoy en día luego de más de un siglo de su estudio. Esta mirada al pasado y a su comprensión actual, nos ayudará a vislumbrar los paradigmas que enfrentamos hoy en el estudio de las estrellas simbióticas, además del papel que juega el Departamento de Astronomía de la Universidad de Guanajuato en el esfuerzo por desentrañar algunos de los misterios que aún los rodean.

2. El expediente simbiótico

El primer acercamiento a las SySts lo realizó Williamina Fleming mientras encabezaba el famoso grupo de "las computadoras de Harvard", pieza clave para el desarrollo del catálogo Henry Draper y el primer sistema de clasificación espectral de la historia. Su trabajo consistía en analizar minuciosamente placas fotográficas con imágenes y espectros de miles de estrellas. En 1901, descubrió que la estrella Z-And mostraba líneas de emisión del Hidrógeno similares a las de una nova,

pero con una curva de luz peculiar, "como la de ninguna otra estrella observada" (Lucy y col., 2024). Posteriormente Annie Jump Cannon, quién continuó el trabajo de Fleming y desarrolló el sistema de clasificación espectral vigente en nuestros días; notó que Z-And y otras estrellas muy parecidas, en realidad no podrían ser clasificadas como novas; dado que exhibían curvas de luz de largo período y también líneas de emisión nebulares asociadas a altas temperaturas (Lucy y col., 2024). Sin embargo, las limitaciones teóricas de la época, cuando los primeros modelos estelares apenas comenzaban a revelar la naturaleza nuclear de las estrellas, impedían poder decir mucho más sobre las observaciones.

Dos décadas después, luego de los aportes de Schwarzschild y Eddington a la comprensión de la física estelar; Paul Merrill identificó líneas de emisión de HeII, típicamente observadas en nebulosas planetarias cuyas estrellas centrales son lo suficientemente calientes para ionizar el material circundante. Merrill encontró estas líneas no solo en Z-And, sino también en CI-Cyg y AX-Per, estrellas que compartían características similares.

Por su parte, Milton Humason; quién había ganado reputación por su colaboración en el análisis espectral, luego de colaborar con Hubble en la medición del corrimiento al rojo de galaxias, aportó espectros de alta calidad desde el Observatorio del Monte Wilson. No solo corroboró las observaciones hechas previamente, sino que además encontró prominentes bandas de TiO, típicas de estrellas frías.

En 1932 estas observaciones resultaban más que desconcertantes: ¿cómo podían coincidir en un mismo espectro las firmas espectrales de dos tipos estelares completamente opuestos en temperatura y estados evolutivos, con un aspecto general que recordaba al de una nebulosa planetaria?

2.1. Armando las piezas del rompecabezas

Una vez más, el conocimiento teórico de la época no permitía explicar con facilidad la naturaleza de estos objetos. No obstante, para 1941 al menos un par de piezas del rompecabezas eran claras. En primer lugar, no era posible la presencia de líneas de emisión en estrellas frías; en segundo lugar, Fleming ya había mostrado la existencia de estrellas frías de la clase "Md" (hoy conocidas como Miras) que exhibían líneas de Balmer; y, por último, se habían

identificado estrellas frías que no solo mostraban líneas de Balmer, sino también emisión de líneas de alta excitación como HeII en un continuo nebular con líneas de [OIII]. Con este panorama, Merrill y Humason plantearon dos escenarios posibles: o bien estas enigmáticas estrellas tenían un compañero lo suficientemente caliente para ionizar fuertemente el entorno, o no eran tan frías como aparentaban (Merrill y Col., 1932). Ambos se inclinaron hacia la posibilidad de un compañero caliente, por lo que las estrellas analizadas por ellos se convirtieron en las primeras pistas claras de un fenómeno en el que dos "especies estelares" convivían de forma íntima. Así, retomando un término de la biología, se abrió un expediente que tomaría varias décadas en reabrirse, dejando en el aire el misterio sobre la naturaleza de estas peculiares estrellas simbióticas.

Este criterio operativo para su identificación fue refinándose hasta la década de 1980, en donde Kenyon (1986) dedicaría la primera monografía exhaustiva a las estrellas simbióticas, estableciendo así los requisitos esenciales para su clasificación: 1) la emisión de iones con potencial de ionización de al menos 35 eV (para el [OIII]) y 2) un continuo estelar del tipo solar con líneas de absorción correspondientes a una estrella evolucionada

(para las bandas de TiO). Aunque el criterio podía diferenciar eficientemente entre las estrellas Md de Fleming y las misteriosas simbióticas, no pasó mucho tiempo antes de que se notara que estos criterios observacionales no serían del todo precisos, y que estarían llenos de excepciones en casos especiales. Aunque la historia de estos objetos, posterior a 1986, es rica en detalles y avances fascinantes; quizá baste con decir que aquella visión "primitiva" evolucionó eventualmente hacia la definición de estrella simbiótica presentada en la introducción de este texto. Sin embargo, conviene hacer algunas puntualidades clave que permiten dar más sentido a esa definición y también permiten profundizar en ella.

El fenómeno simbiótico ocurre en un entorno altamente caótico, dominado por procesos de acreción. El desarrollo de la astronomía observacional, y en particular de la espectroscopia, permitió ampliar nuestra visión sobre estos objetos. Con el tiempo otras especies químicas comenzaron a asociarse con el fenómeno simbiótico. En particular, la detección de otras líneas de alta excitación como [NeV], OVI y [FeVII], reforzó la idea de que estos sistemas debían albergar una componente caliente con una temperatura de al menos 130.000 K,

apuntando así a las enanas blancas como candidatas naturales (Murset y col., 1994). Estos avances se dieron en paralelo con la aparición de los primeros catálogos dedicados exclusivamente a las SySts, como los de Allen (1984) y Belczynński y col. (2000). Por otra parte, el desarrollo de la astronomía más allá del visible introdujo nuevos paradigmas: observaciones con el telescopio Swift revelaron la existencia de gigantes rojas con emisión en rayos-X, señalando así su relación directa no solo con enanas blancas, sino también con estrellas de neutrones y procesos de emisión de alta energía. Este último punto merece un énfasis especial, dado que a la larga lista de excepciones a la definición inicial propuesta por Kenyon se suman ahora comportamientos espectroscópicos exclusivos en el régimen de altas energías. Para quienes deseen profundizar en estos aspectos, se recomienda la lectura de los trabajos de Munari (2019), Murset y col. (1997), Luna y col. (2013) y Toalá (2024).

De forma complementaria, también se han incorporado criterios relacionados con la componente fría y su entorno, gracias a observaciones en el infrarrojo realizadas por misiones como el Two Micro All Sky Survey (2MASS), el Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) y el Infrared Astronomical

Satellite (IRAS). En esta región del espectro, el comportamiento del polvo circundante y la fotosfera estelar juegan un papel clave, ya que pueden enmascarar las propiedades observacionales asociadas a la componente caliente, haciendo todavía más ambigua la clasificación de estos sistemas (Chen y col. 2019). Con base en todo lo anterior, la definición contemporánea de estrella simbiótica, según Mukai y col. (2016), es ***“cualquier estrella binaria en la que una enana blanca o una estrella de neutrones acreta suficiente material de una gigante roja compañera, de tal forma que su interacción puede ser detectada en cualquier longitud de onda”***.

Por supuesto, esta definición sigue enfrentando importantes desafíos en la práctica, ya que la ambigüedad en la identificación de estos sistemas continúa siendo uno de los principales problemas abiertos en el estudio de las estrellas simbióticas.

Aunque más flexible y abierta, no resuelve del todo la complejidad de la interacción entre las componentes del sistema, y lejos de cerrar el caso, lo que hace es abrir nuevas líneas de investigación que pretenden entender con mayor profundidad los mecanismos físicos

que gobiernan a estos sistemas binarios. La naturaleza de sus espectros, los procesos radiativos implicados en los mismos y las distintas formas de acreción siguen siendo pistas clave en este expediente que aún sigue en desarrollo.

3. Revelando el rostro de las estrellas simbióticas

Como vimos en el apartado anterior, la espectroscopia ocupa un lugar central con la que hemos podido estudiar los procesos físicos que definen el comportamiento de las SySts. Es momento ahora de acercarnos con algo más de detalle a los procesos radiativos responsables de sus firmas espectrales más distintivas, así como a la diferenciación fundamental entre los sistemas accreting-only y shell-burning.

3.1. Un espectro estelar compuesto

Tomemos como ejemplo el prototipo de estrella simbiótica CI-Cyg, cuyo espectro en el óptico se presenta en la Figura 1.

El espectro de CI-Cyg muestra todas las características discutidas en los apartados anteriores. Empezando por una intensa línea de H-alpha, acompañada por toda la serie de Balmer; las líneas nebulares como HeI $\lambda 5875,6678,7065$ Å y He II $\lambda 4686$ Å; así

como líneas de alta excitación [FeVII] $\lambda 5720$ Å y [O III] $\lambda 4363,5007$ Å. También se observan claramente las bandas moleculares del TiO a 7053 Å.

Este conjunto de firmas espectrales evidencia que los espectros de las SySts son una combinación de los espectros de una nebulosa planetaria y una estrella gigante roja; lo cual tiene perfecto sentido si consideramos la configuración más típica de estos sistemas.

El entorno inmediato de una estrella simbiótica es extremadamente complejo, y es sensible a parámetros como la separación entre componentes, la temperatura de la enana blanca, la tasa de pérdida de masa de la gigante roja, su pulsación, la presencia o no de polvo, y el estado evolutivo de la componente fría; que puede estar en la RGB o en la AGB. Sin embargo, podemos esquematizar este entorno en dos regiones principales: a) el régimen de la enana blanca y b) el régimen de la gigante roja, ilustrados en la Figura 2.

3.2. El régimen de la enana blanca

En el caso más "general", el régimen de la enana blanca está dominado por la acreción de los vientos estelares provenientes de la gigante roja. La tasa de acreción es un

parámetro importante, que si es del orden de $\sim 10^{-7} M_{\odot}/\text{año}$, propicia la formación de un disco de acreción estable. Este disco permite que el material acretado se fusione sobre la superficie de la enana blanca, alcanzando

Este mecanismo radiativo es crucial para entender la naturaleza simbiótica, ya que implica necesariamente la coexistencia de dos ambientes estelares radicalmente distintos dentro del mismo sistema de

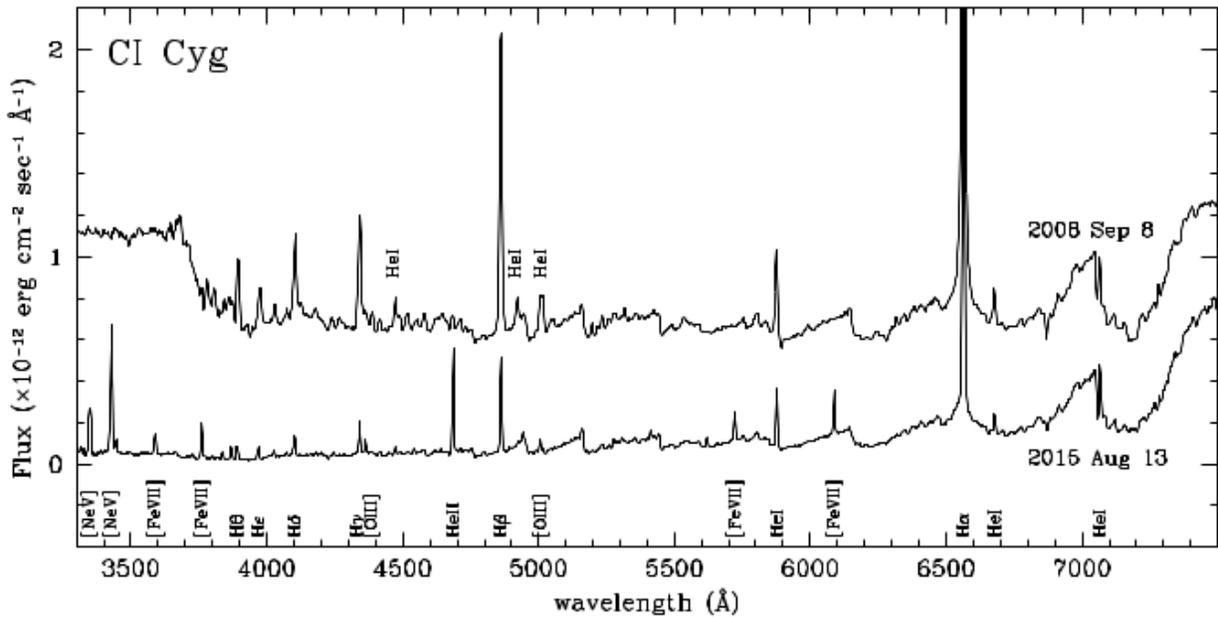


Figura 1. Espectro de la estrella CI-Cyg. Tomado de Munari (2019).

temperaturas del orden de $\sim 10^5$ K (Munari, 2019). Bajo esta configuración, la acreción estable genera un campo de radiación UV intenso proveniente de la fusión del OVI, cuyos fotones de $\lambda 1032,1038 \text{ \AA}$ son dispersados inelásticamente (i.e cediendo parte de su energía por efecto Raman-Stokes) por los átomos de hidrógeno del viento estelar de la gigante roja y desplazados hacia el visible generando las líneas de $\lambda 6825, 7082 \text{ \AA}$ (Schmid y col., 1994).

interacción (WD+RGB). Por ello, las líneas de Raman constituyen una firma espectral única e inequívoca de un sistema simbiótico. De hecho, hasta donde se sabe, **las SySts son los únicos objetos conocidos en el Universo que presentan estas líneas** (Munari et al., 2019). En la Figura 1 pueden observarse claramente en $\lambda 7082 \text{ \AA}$.

En el régimen de la enana blanca, el intenso campo UV también logra ionizar el gas circundante más allá del disco de acreción y que proviene de los vientos de la gigante roja.

Este material está compuesto principalmente por hidrógeno y helio, pero también contiene otras especies químicas más pesadas, transportadas a la envoltura de la gigante roja por medio de los procesos de dredge-up durante su evolución estelar (i.e Fe, O, C, N, Ne).

La presencia de fotones con energía superior a 54.4 eV (equivalente a temperaturas de $T \gtrsim 10^5$ K) permite la ionización del helio neutro, que posteriormente por recombinación produce estas líneas al pasar por transiciones específicas, como la 4–3 hasta el estado base.

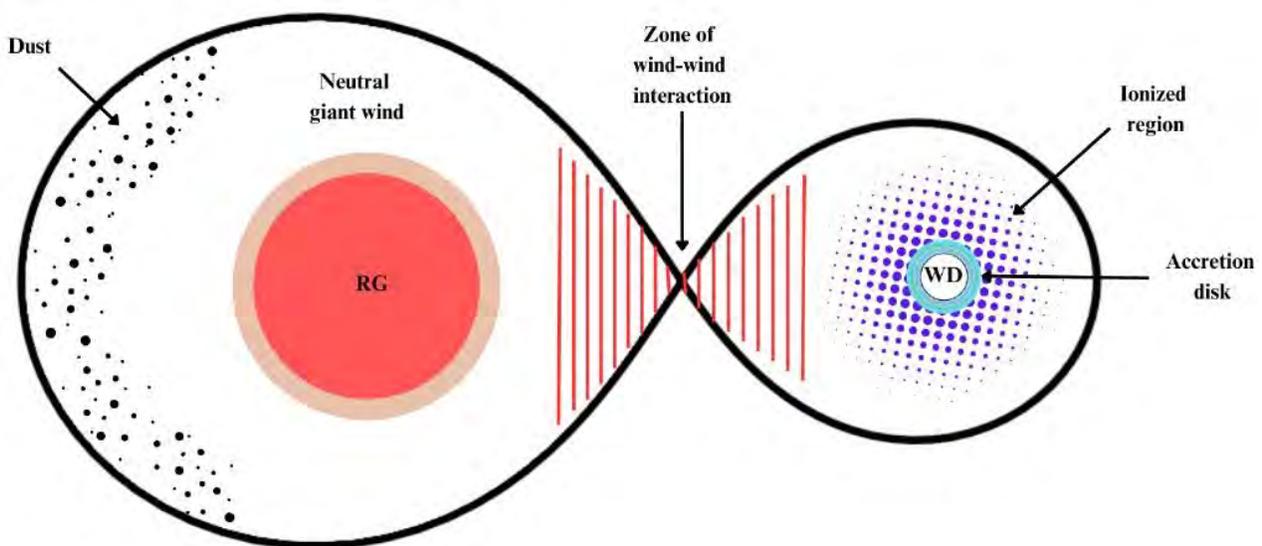


Figura 2. Esquema del sistema simbiótico y los entornos inmediatos a sus componentes

La interacción de este gas enriquecido con la vecindad del campo UV de la enana blanca es responsable de la generación de líneas de alta excitación en los espectros de estrellas simbióticas. En el caso del helio, las líneas de emisión más representativas (i.e HeI $\lambda 5875, 6678, 7065$ Å y HeII $\lambda 4686$ Å) se generan por medio de fotoionización y recombinación radiativa.

Para el caso de las líneas prohibidas de alta excitación como [OIII] $\lambda 4363, 4959, 5007$ Å, los procesos dominantes son las colisiones electrón-ion (~35 eV) seguidas por transiciones metaestables en regiones de temperaturas del orden $\sim 10^4$ K, que se dan en regiones de baja densidad a una distancia típicamente mayor que la región del HeII en la parte externa de la zona nebular ionizada. Por su parte, otras especies altamente ionizadas como [Fe VII] y [Ne V] requieren

energías aún mayores (~ 100 eV), por lo que sus líneas se generan en regiones mucho más cercanas a la enana blanca, donde el campo UV extremo es lo suficientemente intenso como para mantener estos altos estados de ionización

3.3. El régimen de la gigante roja

El entorno de la gigante roja también es crucial para darle sentido a las firmas espectrales de las estrellas simbióticas. Principalmente, las bandas de TiO tienen origen en las capas más externas de la fotosfera de la estrella; donde las temperaturas de $\sim 3 \times 10^3$ K permiten la formación de moléculas en estado gaseoso. Estas moléculas son muy eficientes absorbiendo radiación en el óptico, lo que explica las prominentes bandas de absorción como la centrada en 7053 \AA , visible en el espectro de CI-Cyg (Figura 1).

La forma de estas bandas puede variar por factores como la temperatura efectiva y la metalicidad de la estrella, por lo que hay una gran variedad de componentes frías encontradas en sistemas simbióticos (i.e tipos espectrales M y K). Por otro lado, la envoltura de la gigante roja emite un continuo térmico de baja temperatura que es dominante en las regiones cercanas al

infrarrojo, lo que esconde las importantes contribuciones de la componente caliente en casos especiales como bajas tasas de acreción o bajas temperaturas de la enana blanca. En la región de la RG los vientos estelares son relativamente lentos y densos (~ 20 km/s), que son motivados por tasas de pérdida de masa del orden de $\sim 10^{-7} M_{\odot}/\text{año}$. El papel de los vientos estelares es crítico ya que son la fuente del material para el proceso de acreción sobre la enana blanca y son los responsables de la formación de la región de interacción directa entre los dos regímenes; sin mencionar su importancia en la formación de las líneas de dispersión Raman.

4. El caso de las estrellas perdidas

Cómo hemos visto, los sistemas simbióticos son inherentemente complejos. Esto los hace objetos de gran interés para la astrofísica moderna y laboratorios naturales para estudiar mecanismos como la transferencia de masa y acreción (Shagatova y col. 2023; Merc y col. 2025; Maldonado y col. 2025; Tejeda y col. 2025), la interacción y evolución estelar binaria (Ivanova y col. 2013), los procesos de pérdida de masa (i.e gas y polvo) y la retroalimentación al Medio Interestelar (Vathachira y col. 2025; Planquart y col. 2025), así como la formación de jets, chorros

astrofísicos y nebulosidades (Vasquez-Torres y col. 2024; Santamaría y col. 2024). Sin embargo, en este texto centraremos nuestra atención en el conocido problema del censo galáctico para estrellas simbióticas.

4.1 No todo es lo que parece

Desde una perspectiva histórica, y por razones prácticas, la identificación de estrellas simbióticas basada en criterios espectroscópicos se ha centrado en la detección de líneas de emisión típicas asociadas a la componente caliente, como las que ya hemos discutido (i.e [FeVII], H α , [OIII], HeII); particularmente la detección de las líneas de dispersión amplia de Raman OVI λ 6830,7088 Å suponen el criterio principal para una identificación positiva de su naturaleza (Munari, 2019).

Naturalmente, debido a su naturaleza ambigua y a la complejidad de los mecanismos que permiten revelar su presencia, los esfuerzos para detectar estrellas simbióticas enfrentan múltiples desafíos, desde lidiar con falsos positivos, verificar identificaciones erróneas y muy probablemente, omitir sistemas que se ocultan bajo la apariencia dominante de su

componente fría. Estas dificultades son respaldadas por las estadísticas actuales, que evidencian claramente que el modelo "general" que hemos presentado (i.e con líneas Raman prominentes, intensa emisión H-alpha y líneas de alta excitación), representa, en realidad, un caso excepcional dentro de un amplio y diverso zoológico de configuraciones posibles. De hecho, en la actualidad parece que se está llegando al consenso de que la presencia de las líneas de Raman es un criterio suficiente pero no necesario para una identificación positiva. Esto es que su aparición garantiza la naturaleza simbiótica del sistema, pero su ausencia no la descarta.

De las 285 estrellas simbióticas actualmente confirmadas, menos del 50% presentan líneas de Raman, y más del 85% tienen configuraciones en donde la emisión en el cercano infrarrojo (i.e donde debería estar la línea de Raman), está completamente dominada por la emisión fotosférica de la gigante (Merc, 2025).

En la Figura 3 se presentan todos los diferentes comportamientos espectrales correspondientes a todas las configuraciones hasta ahora conocidas de estrellas simbióticas.

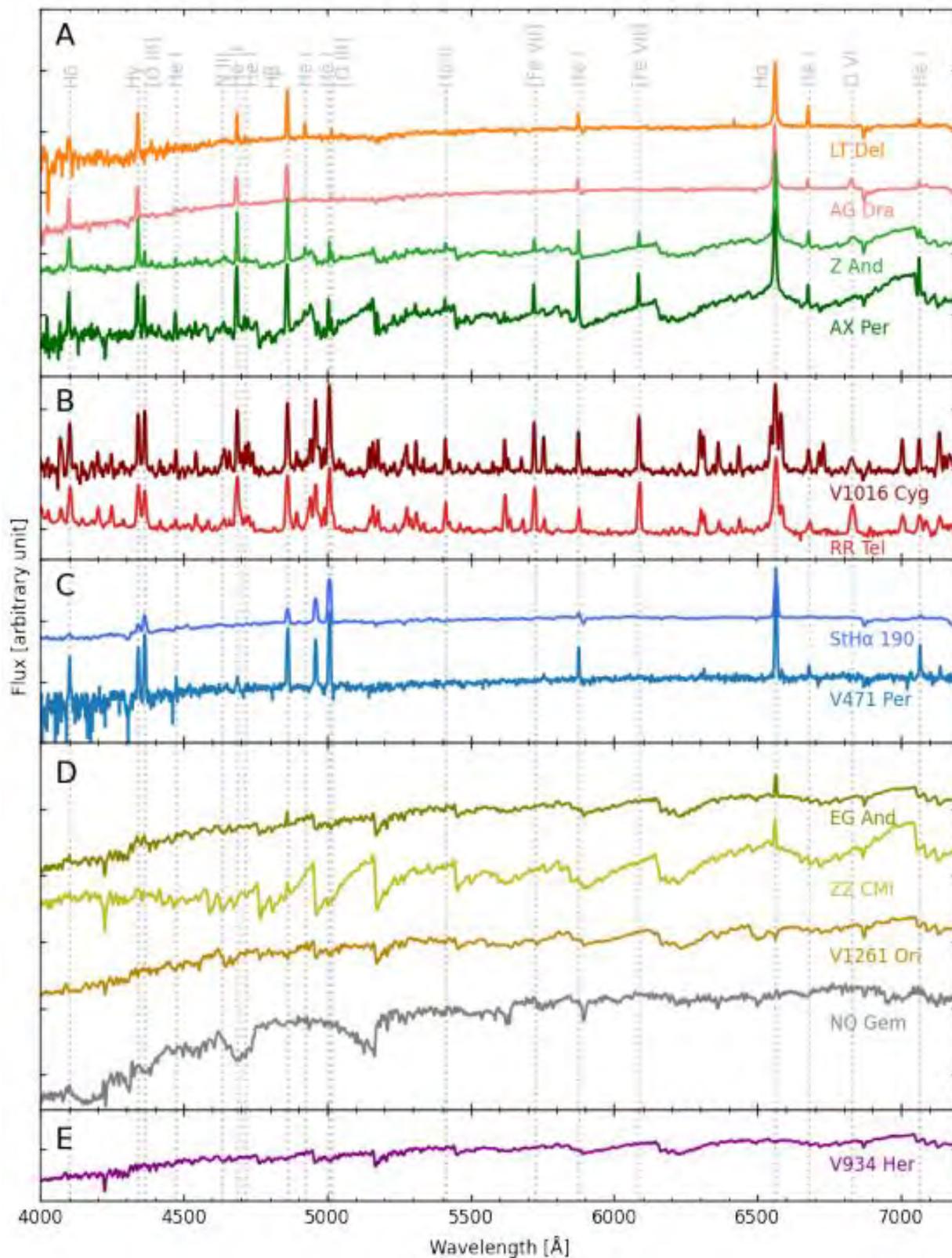


Figura 3. Espectros visibles de todos los tipos de SySts conocidos. Tomado de (Merc, 2025)

El panel A muestra los sistemas del tipo S, donde es evidente que la línea de Raman no siempre está presente o es intensa, aunque la naturaleza simbiótica se puede inferir por la presencia de líneas de alta excitación en combinación con bandas de TiO.

En los paneles B y C se muestran espectros de sistemas simbióticos polvorientos de los tipos D y D'. En estas configuraciones, la componente fría está en un estado evolutivo avanzado (AGB) y tiene una envoltura polvorienta con emisión infrarroja muy prominente, que alcanza un pico más allá del visible en $\sim 10.000 \text{ \AA}$ para el tipo D y $\sim 20.000 \text{ \AA}$ para el caso D' según Merc y col. (2025).

Además, las componentes están muy separadas, lo que puede impedir la formación completa de un disco de acreción, favoreciendo en cambio la transferencia de masa por captura de vientos estelares. Esto explica por qué las líneas de Raman no son evidentes, aunque en varios casos sí lo son las líneas de alta excitación. El tipo D' representa $\sim 3\%$ de la población simbiótica conocida, mientras que el tipo D representa $\sim 15\%$ y sus espectros pueden parecerse notablemente a los de una nebulosa planetaria. Finalmente, en los paneles D y E se observan los espectros de la población del tipo accreting-only.

Es evidente que en este tipo de sistemas las líneas de alta excitación son nulas o muy débiles, y también se observa la ausencia completa de líneas de Raman y, en varios casos, incluso de la línea de H-alpha.

4.2 Muchos observables y pocas pistas: números desconcertantes

La discusión anterior implica que los sistemas simbióticos pueden ser clasificados en dos grupos principales de acuerdo con las firmas de actividad observables en sus espectros:

1) **shell-burning**, si la tasa de acreción es lo suficientemente alta para desencadenar la quema nuclear del material acumulado, generando temperaturas que sostienen procesos de ionización. Estos espectros muestran espectros ricos en líneas de emisión (e.g. CI-Cyg, Tipo S, D, D').

2) **accreting-only**, si la tasa de acreción es baja o el material aún no ha alcanzado las condiciones necesarias para iniciar la quema nuclear, o si la enana blanca no es lo suficientemente caliente (Munari et al. 2021a; Perko 2024).

En este caso, el espectro está dominado por la componente fría y los procesos radiativos asociados al régimen de la gigante roja; con

pocas, muy débiles o ninguna línea de emisión visible (e.g paneles D y E de la Figura 3).

Los modelos de población para estrellas simbióticas en la Vía Láctea revelan discrepancias significativas comparados con su población observada. La primera estimación, realizada por Kenyon y col. (1984), sugirió una población de ~ 3000 estrellas simbióticas. Modelos posteriores han propuesto poblaciones en un rango desde 1.2×10^3 hasta 4×10^5 estrellas simbióticas en la galaxia (Munari and Renzini 1992; Kenyon et al. 1993; Magrini et al. 2003; Lü et al. 2006). Sin embargo, la última actualización del censo en la galaxia ha reportado 285 estrellas simbióticas confirmadas, lo que representa únicamente el $\sim 9\%$ de la población estimada para la Vía Láctea; asumiendo una cota modesta para los modelos teóricos considerados.

Es inevitable preguntarse, entonces, dónde radica el problema del censo: **¿se trata de un sesgo inherente a los modelos de población o es un asunto de limitaciones sobre las observaciones?**

4.3 Aproximaciones a la solución del problema.

En trabajos recientes (Botello 2023; Akras 2023; Akras y col. 2021) técnicas de machine learning han sido aplicadas para distinguir candidatos potenciales a estrellas simbióticas de otros sistemas binarios y fuentes (eg. Variables cataclísmicas, nebulosas planetarias, estrellas RGB, AGB y PAGB, Miras, enanas blancas y regiones HII) con firmas espectrales parecidas. Estas aproximaciones se basan en la construcción de diagramas de color-color diagnóstico usando datos de diferentes sondeos como el INT Photometric H-alpha Survey IPHAS (Drew y col. 2005), el Two Micron All Sky Survey 2MASS (Skrutskie y col. 2006) y el Wide-Field Infrared Survey Explorer WISE en las regiones del visible, el cercano y el medio infrarrojo respectivamente.

De manera específica, Akras y col. (2019) aplicó algoritmos de árboles de decisión, análisis de discriminante lineal y K-vecinos más cercanos a una muestra de estrellas simbióticas y objetos de clasificación bien conocida con colores similares a los de dichos sistemas. Esto permitió identificar una lista de criterios fotométricos útiles para diferenciar estas poblaciones a partir de las bandas de

2MASS y WISE. Estos criterios han demostrado ser efectivos, con una tasa de éxito del 71 % en la detección de estrellas simbióticas a partir de candidatos del survey IPHAS, según Akras et al. (2021). Por su parte, Botello (2023) empleó los mismos criterios utilizando técnicas de minería de datos en los surveys Sloan Digital Sky Survey (SDSS) y NT/WFC Photometric H-alpha Survey of the Northern Galactic Plane (IGAPS), identificando 238 nuevos candidatos a estrellas simbióticas. Además, mediante observaciones espectroscópicas de 50 objetos confirmó la naturaleza simbiótica de dos estrellas, reportándolas como nuevas estrellas simbióticas de tipo shell-burning.

Aunque estos nuevos enfoques basados en aprendizaje automático de máquinas han cobrado relevancia al usarse con datos de grandes surveys, y han permitido proponer miles de nuevos candidatos a sistemas simbióticos que antes no se habrían tenido en cuenta bajo criterios espectroscópicos tradicionales, deben ser discutidos con cautela. Una limitación clave de estos enfoques es que, si bien pueden identificar correlaciones estadísticas entre las propiedades fotométricas de las estrellas, estas diferencias suelen ser extremadamente sutiles entre los objetos los sistemas

simbióticos usados como entrenamiento y otros tipos de sistemas estelares que pueden compartir características similares en el espacio de color-magnitud. Lo anterior porque los sistemas simbióticos exhiben rasgos de poblaciones diametralmente opuestas en términos fotométricos; y el análisis de aprendizaje automático puede caer en el sesgo de los objetos fríos o los objetos calientes fácilmente. Ha sido frecuente la confusión de candidatos simbióticos reportados como identificados cuando en realidad eran objetos calientes solitarios, como YSO's o gigantes frías solitarias (Merc, 2025).

Por tanto, resulta crucial enfatizar que la clasificación fotométrica, por potente que sea, debe considerarse como un primer paso en el proceso de identificación. La validación espectroscópica sigue siendo indispensable para confirmar la naturaleza simbiótica de un sistema, evaluar la presencia de líneas características y descartar posibles confusiones con fuentes contaminantes. Esto es particularmente importante dado que el censo observado aún representa una fracción mínima de la población esperada, y los sesgos introducidos por métodos automáticos pueden reforzar visiones incompletas o

erróneas sobre la demografía y diversidad de estos sistemas.

5. Estrellas enigmáticas y dónde encontrarlas

Antes de mencionar algunos de los aportes del departamento de Astronomía de la UG a la solución del problema del censo galáctico para estrellas simbióticas, es pertinente destacar una limitación importante de las campañas de confirmación espectroscópica basadas en candidatos identificados con métodos de aprendizaje automático: la mayoría de estas campañas sigue priorizando los sistemas shell-burning en sus esquemas de clasificación (Akras y col. 2023; Lucy y col. 2024).

Si consideramos una estadística simple, basada en los tiempos evolutivos de las estrellas que dominan el espectro de sistemas accreting-only ($\sim 10^5$ yr) y la fase de evolución en la envoltura común; que es donde se dan las condiciones necesarias para observar los rasgos espectrales de los sistemas shell-burning ($\sim 10^2$ yr), es posible concluir que para lograr observar una estrella simbiótica con todas las líneas de emisión características, se deben observar al menos mil estrellas candidatas (1:1000). Esta abismal proporción podría ser la clave para

explicar el problema del censo en términos de un sesgo observacional que desfavorece a los sistemas accreting-only. Esto plantea la pregunta de **¿hasta qué punto estamos subestimando la población real de estrellas simbióticas simplemente porque sus configuraciones más comunes no encajan con los modelos espectrales tradicionales?**

Observacionalmente, los sistemas accreting-only suponen una población sub-representada, al constituir únicamente el 12% (36 de las 285 conocidas) entre las estrellas simbióticas confirmadas en la galaxia (Munari et al. 2021a; Merc et al. 2019). Como prototipo de estos sistemas, la estrella simbiótica SU Lyn (Figura 4) ha sido ampliamente estudiada por varios autores (Perko 2024; Munari et al. 2021a; Mukai et al. 2016). Este es un sistema asociado a una estrella gigante de clase espectral M6III de $V \sim 8$ mag a 650 ± 35 pc de distancia. En particular, SU Lyn ha sido observada por el telescopio Copernico de 1.82 m desde el Observatorio Astrofísico de Asiago en Veneto, Italia. El objeto presenta variabilidad en el comportamiento de su perfil espectral; mostrando épocas con una emisión de líneas de Balmer y [NeIII] muy débiles, acompañadas de un amplio exceso de flujo en

la parte más azul de su espectro óptico ($\sim 4000 \text{ \AA}$).

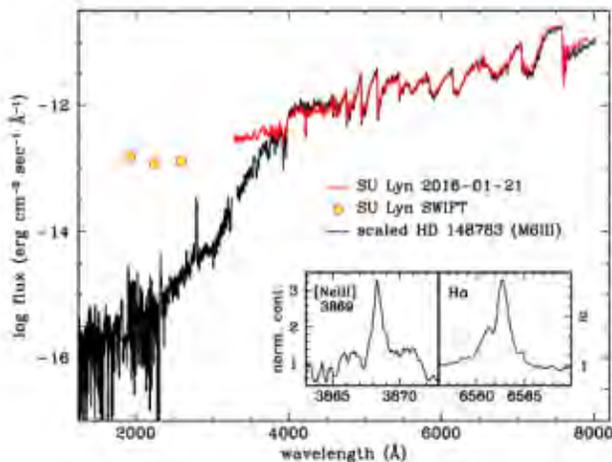


Figura 4. Espectros comparados de SU-Lyn y HD14783. Tomado de (Mukai, 2021)

Esta estrella también presenta emisión de rayos-X duros y variabilidad en la región del UV cercano observada con el instrumento UVOT del observatorio espacial Swift. En la Figura 4 se muestran dos espectros de baja resolución para SU-Lyn tomados en diferentes épocas, diferenciando en rojo y negro las variaciones espectrales para estados de alta y baja tasa de acreción del sistema simbiótico. En amarillo se muestran mediciones para SU Lyn en la región del UV realizadas con Swift UVOT, comparadas con el comportamiento normal de una estrella gigante roja de tipo espectral M (HD 14783).

Además, los recuadros inferiores muestran la presencia de muy débiles líneas de emisión en

un espectro de alta resolución tomado la misma noche que el espectro de baja resolución. Estas observaciones suponen que los períodos de baja actividad en el disco de acreción de estrellas simbióticas están relacionados con emisiones muy débiles de las líneas de Balmer y un exceso de flujo en la región del UV cercano ($\sim 4000 \text{ \AA}$).

Otro ejemplo de sistemas similares ha sido reportado por Munari et al. (2021b) en su estudio de la estrella simbiótica 2SXPS J173508.4-292958. Esta estrella ha sido reportada como una fuente variable de rayos-X observada por Swift, mostrando una débil emisión también variable en las líneas de H α observada entre abril y agosto de 2020. En este caso particular, la variación de flujo en la línea de Balmer es más pronunciada llegando incluso a desaparecer, aunque la emisión en rayos-X se mantenga (ver Figura 5).

Adicionalmente, se observó una variabilidad fotométrica con un período de 38 días en la banda V; que no es atribuida a Roche-lobe filling y que tampoco se correlaciona con la emisión variable de H-alpha. Este comportamiento espectral y fotométrico en la estrella, corresponde también con un exceso de flujo en la banda U ($\sim 4000 \text{ \AA}$) que de acuerdo con Munari et al. (2021b), podría

relacionarse con la emisión directa del disco de acreción alrededor de la componente caliente del sistema.

recuperar la población de sistemas accreting-only, descartada por la ausencia de firmas espectrales evidentes, por medio de la

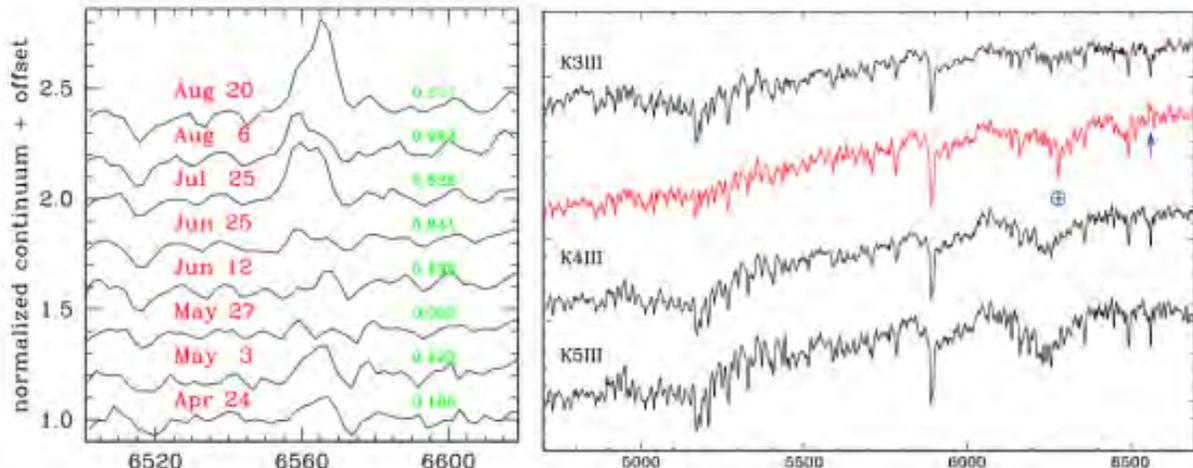


Figura 5. Espectro óptico de baja resolución y variabilidad de la línea de H-alpha en la estrella 2SXPS J173508.4-292958. Tomado de (Mukai, 2021)

Finalmente, otra firma de actividad simbiótica que no está asociada con los rasgos espectrales del sistema es la presencia de flickering. Este es una variabilidad rápida y estocástica en el brillo de objetos que sostienen procesos de acreción (Merc y col. 2023). Se ha encontrado que al menos un 20% de la población verdadera de estrellas simbióticas muestra flickering óptico detectable, aunque este fenómeno puede estar subestimado debido a la dificultad de observarlo cuando la emisión de la gigante roja o la nebulosa circundante es dominante (Lucy y col. 2024; Ilkiewicz y col. 2016, Zamanov y col. 2017; Sokoloski y col. 2001). Estas observaciones muestran que es posible

detección de al menos 2 de tres observables que dan cuenta de la actividad simbiótica: el exceso de flujo en la región del UV cercano ($\sim 4000 \text{ \AA}$), la presencia de débiles o variables líneas de H-alpha observadas en baja o alta resolución, y la presencia de flickering.

5.1 Aportes del Departamento de Astronomía de la UG

El Departamento de Astronomía de la UG, ha centrado parte de sus esfuerzos investigativos en identificar y caracterizar especialmente a las simbióticas accreting-only, que han permanecido ocultas y carecen de líneas intensas de emisión que puedan revelar

fácilmente su naturaleza. Este esfuerzo, liderado por el estudiante de maestría Daniel Felipe Mera-Valverde, con la dirección conjunta del Dr. Klaus-Peter Schröder (UG) y la Dra. Laurence Sabin (IA-UNAM Ensenada), ha demostrado ser una línea de trabajo prometedora para atacar directamente los sesgos observacionales que han marginado históricamente a los sistemas sin actividad acretora activa.

El proyecto parte de la premisa que los sistemas accreting-only representan una fracción dominante del conjunto total de estrellas simbióticas, entonces se requieren nuevas herramientas y criterios de búsqueda que no dependan exclusivamente de la presencia de líneas de emisión intensas como $H\alpha$, He II o las líneas Raman.

En esta dirección, el equipo desarrolló un pipeline de análisis espectral especializado, diseñado para detectar exceso de flujo en el ultravioleta cercano en espectros de baja resolución, mediante la comparación con plantillas sintéticas de gigantes rojas tipo M y K (Flucks y col. 1999; Kesseli et al. 2017; Sánchez-Blázquez et al. 2006).

Durante el periodo 2024–2025, se analizaron 56 candidatos previamente seleccionados mediante fotometría multibanda (Botello

2023; IA-UNAM), aplicando este pipeline a datos espectroscópicos obtenidos en campañas realizadas con los telescopios de 2.1 m del Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir y del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro.

Los resultados preliminares han sido prometedores: 14 de los 56 candidatos presentaron emisión débil en $H\alpha$, y uno de ellos mostró emisión de la línea Raman O VI $\lambda 7088$, lo cual podría indicar un sistema en transición entre los tipos accreting-only y shell-burning. En conjunto, estos hallazgos refuerzan la hipótesis de que una porción significativa de las estrellas simbióticas permanece fuera del radar de los métodos de identificación tradicionales, y que las campañas de confirmación actuales tienden a subestimar esta población.

Como parte del trabajo en curso, se han planificado dos temporadas adicionales de observación (julio 2025) para cubrir los 14 nuevos candidatos mediante espectroscopía de mediana resolución y fotometría coordinada para la detección de flickering en las fuentes de interés, con los instrumentos MEXMAN y OPTICAM.

6. Conclusiones y comentarios finales

Las estrellas simbióticas son objetos tan fascinantes como enigmáticos. Su existencia no solo desafía las concepciones tradicionales sobre la forma en que los sistemas binarios pueden evolucionar e interactuar, sino que también muestra las limitaciones de nuestras herramientas más confiables para estudiar los objetos astrofísicos. La historia de su descubrimiento y caracterización ejemplifica cómo el desarrollo de herramientas teóricas y observacionales van de la mano y son co-dependientes para cualquier campo de la astronomía moderna.

La discrepancia entre los modelos de población y el número de sistemas confirmados sugiere que, aunque hemos encontrado algunas, muchas otras permanecen escondidas, disfrazadas o simplemente inadvertidas. Como se ha argumentado en este texto, una parte sustancial de esta invisibilidad proviene del sesgo que tenemos hacia los sistemas shell-burning, cuyas firmas espectrales son claras, intensas y relativamente fáciles de detectar.

El futuro del estudio de las estrellas simbióticas sugiere cambiar la mirada. La búsqueda debe incluir métodos complementarios, como la detección de

exceso ultravioleta, el análisis de flickering y el seguimiento espectroscópico sensible a líneas débiles. Paradójicamente, este tipo de enfoques si podría beneficiarse sustanciosamente de futuros surveys especializados para las regiones de altas energías.

En este contexto, los esfuerzos realizados desde el Departamento de Astronomía de la Universidad de Guanajuato, con herramientas accesibles y enfoques innovadores, representan una contribución significativa no solo para aumentar el número de sistemas identificados, sino para reconstruir el perfil más diverso y menos evidente de la población simbiótica de la Vía Láctea, reafirmando que el expediente simbiótico aún está lejos de cerrarse.

Referencias bibliográficas

Allen, D. A. (1984). A catalogue of symbiotic stars. *Proc. ASA*, 5(3), 369.

Akras, S., Guzman-Ramirez, L., Ramos-Larios, G., & Sabin, L. (2023). A photometric search for symbiotic stars in the Galactic plane. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 520(1), 458–470. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad248>

Akras, S. (2023). Where are the missing symbiotic stars? Uncovering hidden symbiotic stars in public catalogues. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 519(4), 6044–6054. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad096>

Akras, S., Leal-Ferreira, M. L., Guzman-Ramirez, L., & Ramos-Larios, G. (2019). A machine learning approach for identification and classification of symbiotic stars using 2MASS and WISE. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 483(4), 5077–5104. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty3359>

Akras, S., Gonçalves, D. R., Alvarez-Candal, A., & Pereira, C. B. (2021). Discovery of five new Galactic symbiotic stars in the VPHAS+ survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 502(2), 2513–2517. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab195>

Belczyński, K., Mikołajewska, J., Munari, U., Ivison, R. J., & Friedjung, M. (2000). A catalogue of symbiotic stars. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 146(3), 407–435.

Botello, M. K. (2023). Caracterización fotométrica de estrellas frías candidatas a sistemas simbióticos en el plano galáctico.

Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.

Corradi, R. L. M., Rodríguez-Flores, E. R., Mampaso, A., Greimel, R., Viironen, K., Drew, J. E., Lennon, D. J., Mikolajewska, J., Sabin, L., & Sokoloski, J. L. (2008). IPHAS and the symbiotic stars. I. Selection method and first discoveries. *Astronomy & Astrophysics*, 480(2), 409–419. <https://doi.org/10.1051/00046361:20078989>

Duchêne, G., & Kraus, A. (2013). Stellar multiplicity. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 51(1), 269–310. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081710-102602>

Drew, J. E., Greimel, R., Irwin, M. J., Aungwerojwit, A., Barlow, M. J., Corradi, R. L. M., Drake, J. J., Gänsicke, B. T., Groot, P., Hales, A., Hopewell, E. C., Irwin, J., Knigge, C., Leisy, P., Lennon, D. J., Mampaso, A., Masheder, M. R. W., Matsuura, M., Morales-Rueda, L., ... Zurita, A. (2005). The INT Photometric H α Survey of the Northern Galactic Plane (IPHAS). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 362(3), 753–776. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09330.x>

DeWitt, C. N., Zamanov, R. K., Stoyanov, K. A., Bode, M. F., & Tomov, T. (2013). Candidate symbiotic stars from the IPHAS survey. *Astronomical Journal*, 146(4), 109. <https://doi.org/10.1088/00046256/146/4/109>

Fluks, M. A., Plez, B., The, P. S., de Winter, D., Westerlund, B. E., & Steenman, H. C. (1994). On the spectra and photometry of M-giant stars. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 105, 311–336.

Güver, T., & Özel, F. (2009). The relation between optical extinction and hydrogen column density in the Galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 400(4), 2050–2053. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15598.x>

Ĺkiewicz, K., Mikołajewska, J., Stoyanov, K. A., Manousakis, A., & Miszalski, B. (2016). Active phases and flickering of a symbiotic recurrent nova T CrB. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462(3), 2695–2705. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw1837>

Ivanova, N., Justham, S., Chen, X., De Marco, O., Fryer, C. L., Gaburov, E., ... & Webbink, R. F. (2013). Common envelope evolution: Where we stand and how we can move forward. *The Astronomy and*

Astrophysics Review, 21, 59. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2020cee..book....I/doi:10.1088/2514-3433/abb6f0

Jia, K., Esamdin, A., & Li, J. Z. (2023). Spectral properties of new symbiotic star candidates from LAMOST. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 23(3), 035001. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/acbd8d>

Kenyon, S. J., & Webbink, R. F. (1984). The nature of symbiotic stars. *The Astrophysical Journal*, 279, 252–283. <https://doi.org/10.1086/161888>

Kenyon, S. J., Mikołajewska, J., Mikołajewski, M., Polidan, R. S., & Slovak, M. H. (1993). Evolution of the symbiotic binary system AG Pegasi: The slowest classical nova ever recorded. *The Astronomical Journal*, 106, 1573. <https://doi.org/10.1086/116749>

Kesseli, A. Y., West, A. A., Veyette, M., Harrison, B., Feldman, D., & Bochanski, J. J. (2017). An empirical template library of stellar spectra for a wide range of spectral classes, luminosity classes, and metallicities using SDSS BOSS spectra. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 230(2), 16.

https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2017ApJS..230...16K/doi:10.3847/1538-4365/aa656d

Lü, G., Yungelson, L., & Han, Z. (2006). Population synthesis for symbiotic stars with white dwarf accretors. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 372(3), 1389–1406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10947.x>

Lucy, A., Sokoloski, J., Luna, G. J. M., Mukai, K., Nuñez, N., Buckley, D. A. H., Breytenbach, H., Paul, B., Potter, S., Manick, R., Howell, D. A., Wolf, C., & Onken, C. A. (2024). A new way to find symbiotic stars: Accretion disc detection with optical survey photometry. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, in press.

Luna, G. J. M., Sokoloski, J. L., Mukai, K., & Nelson, T. (2013). Symbiotic stars in X-rays. *Astronomy & Astrophysics*, 559, A6.

Maldonado, R., Toalá, J. A., Rodríguez-González, J. B., & Tejeda, E. (2025). The impact of wind accretion in evolving symbiotic systems. arXiv preprint. <https://arxiv.org/abs/2502.11325>

Magrini, L., Corradi, R. L. M., & Munari, U. (2003). A search for symbiotic stars in the Local Group. In R. L. M. Corradi, J.

Mikolajewska, & T. J. Mahoney (Eds.), *Symbiotic stars probing stellar evolution* (Vol. 303, p. 539). *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003ASPC..303..539M>

Merc, J., & Boffin, H. M. J. (2025). Revisiting symbiotic binaries with interferometry. I. The PIONIER archival collection. *Astronomy & Astrophysics*, 681, A90. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202553789>

Merc, J., Beck, P. G., Mathur, S., & García, R. A. (2023). Accretion-induced flickering variability among symbiotic stars from space photometry with NASA TESS. *Astronomy & Astrophysics*, 671, A156. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348116>

Merc, J., Gális, R., & Wolf, M. (2019). First release of the new online database of symbiotic variables. *Research Notes of the American Astronomical Society*, 3(2), 28. <https://doi.org/10.3847/2515-5172/ab0429>

Mukai, K., Luna, G. J. M., Cusumano, G., Segreto, A., Munari, U., Sokoloski, J. L., Lucy, A. B., Nelson, T., & Nuñez, N. E. (2016). SU Lyncis, a hard X-ray bright M

giant: Clues point to a large hidden population of symbiotic stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 461(1), L1–L5.

<https://doi.org/10.1093/mnras/slw087>

Munari, U. (2019). The symbiotic stars. In *The Impact of Binary Stars on Stellar Evolution* (Vol. 54, p. 77).

https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2019arXiv190901389M/doi:10.48550/arXiv.1909.01389

Munari, U., Traven, G., Masetti, N., Valisa, P., Righetti, G. L., Hamsch, F. J., Frigo, A., Čotar, K., De Silva, G. M., Freeman, K. C., Lewis, G. F., Martell, S. L., Sharma, S., Simpson, J. D., Ting, Y. S., Wittenmyer, R. A., & Zucker, D. B. (2021a). The GALAH survey and symbiotic stars – I. Discovery and follow-up of 33 candidate accreting-only systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505(4), 6121–6154.

<https://doi.org/10.1093/mnras/stab1620>

Munari, U., Valisa, P., Vagnozzi, A., Dallaporta, S., Hamsch, F. J., & Frigo, A. (2021b). Photometry and spectroscopy of the new symbiotic star 2SXPS J173508.4-292958. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 51(2), 103–117.

<https://doi.org/10.31577/caosp.2021.51.2.10>

Munari, U., & Renzini, A. (1992). Are symbiotic stars the precursors of Type IA supernovae? *The Astrophysical Journal Letters*, 397, L87.

Munari, U., Iłkiewicz, K., & Mikołajewska, J. (2021a). Symbiotic stars accreting only: SU Lyn and a dozen more. *Baltic Astronomy*, 30(1), 53–64.

Mürset, U., Nussbaumer, H., Schmid, H. M., & Vogel, M. (1991). Temperature and luminosity of hot components in symbiotic stars. *Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361)*, vol. 248, no. 2, Aug. 1991, p. 458-474. *Research supported by SNSF.*, 248, 458-474.

<http://adsabs.harvard.edu/abs/1991A%26A...248..458M>

Perko, A. (2024). Flickering in the symbiotic binary SU Lyn: A system powered only by accretion. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 531(2), 1542–1553.

<https://doi.org/10.1093/mnras/stad145>

Planquart, L., Jorissen, A., & Van Winckel, H. (2025). Resolving the mass transfer in the symbiotic recurrent nova T Coronæ Borealis. *Astronomy & Astrophysics*, 682, A17.

<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202452833>

Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., Weinberg, M. D., Schneider, S., Carpenter, J. M., Beichman, C., Capps, R., Chester, T., Elias, J., Huchra, J., Liebert, J., Lonsdale, C., Monet, D. G., Price, S., Seitzer, P., Jarrett, T., Kirkpatrick, J. D., Gizis, J. E., ... Wheelock, S. (2006). The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *The Astronomical Journal*, 131(2), 1163–1183. <https://doi.org/10.1086/498708>

Santamaría, E., Toalá, J. A., Liimets, T., Guerrero, M. A., Botello, M. K., Sabin, L., & Ramos-Larios, G. (2024). Shaping the nebula around the symbiotic system R Aquarii. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 532(2), 2511–2520. <https://doi.org/10.1093/mnras/stae253>

Shagatova, N., Skopal, A., & Cariková, Z. (2023). Wind mass transfer in S-type symbiotic binaries. *Astronomy & Astrophysics*, 678, A12. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525645e>

Sokoloski, J. L., Bildsten, L., & Ho, W. C. G. (2001). A search for rapid photometric variability in symbiotic binaries. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 326(2), 553–577. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04582.x>

Schmid, H. M., & Schild, H. (1994). Raman scattered emission lines in symbiotic stars: a spectropolarimetric survey. *Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361)*, vol. 281, no. 1, p. 145-160, 281, 145-160.

Tejeda, E., & Toalá, J. A. (2025). Geometric correction for wind accretion in binary systems. *The Astrophysical Journal*, 980(2), 226. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/acd57e>

Toalá, J. A. (2024). Reflection physics in X-ray-emitting symbiotic stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 528(1), 987-996. <https://doi.org/10.1093/mnras/stae039>

Vasquez-Torres, D. A., Toalá, J. A., Sacchi, A., Guerrero, M. A., Tejeda, E., Karovska, M., & Montez Jr., R. (2024). The impact of periastron passage on the X-ray and optical properties of the symbiotic system R Aquarii. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 535(3), 2724–2741. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2024MNRAS.535.2724V/doi:10.1093/mnras/stae2538

Vathachira, I., Hillman, Y., & Kashi, A. (2025). Exploring mass transfer mechanisms in symbiotic systems. *The Astrophysical*

Journal, 948(1), 39.

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/adabca>

Whitelock, P. A., & Munari, U. (1992). Photometric properties of symbiotic stars and the nature of the cool component. *Astronomy and Astrophysics*, 255, 171–180.

Zamanov, R. K., Boeva, S., Nikolov, Y., Petrov, B., Bachev, R., Latev, G., Popov, V., Stoyanov, K., Bode, M., Martí, J., Tomov, T., & Antonova, A. (2017). Discovery of optical flickering from the symbiotic star EF Aquilae. *Astronomische Nachrichten*, 338(6), 680–685.

<https://doi.org/10.1002/asna.201713362>