

## M17-UC1: UNA REGIÓN CLAVE PARA EL ESTUDIO DE LA FORMACIÓN ESTELAR MASIVA

J. Grisales-Casadiegos <sup>a,\*</sup>, Josep M Masqué <sup>b</sup>, Dennis Jack <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Astronomía de la Universidad de Guanajuato, Callejón de Jalisco S/N; Valenciana;  
C.P. 36240; Guanajuato, Gto.

<sup>b</sup> Institut de Ciències del Cosmos y Departament de Física Quàntica i Astrofísica (Universitat de  
Barcelona), Martí i Franquès 1, E-08028 Barcelona, Catalunya, Spain.

[\\*j.grisalescasadiego@ugto.mx](mailto:j.grisalescasadiego@ugto.mx)

### Resumen

Presentamos una revisión de los resultados observacionales de la región H II hipercompacta M17-UC1. Enmarcado en mi tesis doctoral del Departamento de Astronomía de la Universidad de Guanajuato, ofrecemos una síntesis cronológica y crítica de los avances más relevantes en radio e infrarrojo, incluyendo evidencias observacionales de la presencia de disco, *outflow* bipolar junto a la caracterización fotométrica (SED). Estas observaciones apuntan a una alta luminosidad bolométrica y sugiere que UC1 es una estrella muy masiva ( $48\text{--}64 M_{\odot}$ ). Sobre esta base, delineamos la metodología que implementamos con ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) para resolver su dinámica interna: (i) descomponer el continuo en polvo y libre-libre para aislar el disco y estimar su masa superficial; (ii) cartografiar el gas ionizado con líneas de recombinación (p. ej., H26α, H36α) y derivar campo de velocidades entre otros parámetros; y (iii) trazar el gas molecular caliente (p. ej., CH<sub>3</sub>OCHO) para medir rotación, además de cuantificar el *outflow*. El objetivo es pasar de una descripción principalmente morfológica a un inventario físico coherente —masa, cinemática ionizada/molecular y retroalimentación— que consolide a UC1 como una muestra que pone a prueba la hipótesis de acreción mediada por disco bajo fuerte retroalimentación.

*Palabras clave:* Formación estelar masiva; regiones H II hipercompactas; M17-UC1; disco de acreción.

## M17-UC1: A KEY REGION FOR THE STUDY OF MASSIVE STAR FORMATION

### Abstract

We present a review of observational results from the hypercompact H II region M17-UC1. As part of my doctoral thesis in the Department of Astronomy at the University of Guanajuato, we offer a chronological and critical synthesis of the most relevant advances in radio and infrared, including evidence of a disk, bipolar outflow, and photometric characterization (SED) that points to high bolometric luminosity and suggests that UC1 is a very massive star ( $48\text{-}64 M_{\odot}$ ). On this basis, we outline the methodology we implemented with ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) to resolve its internal dynamics: (i) decomposing the continuum into dust and free-free to isolate the disk and estimate its surface mass; (ii) map the ionized gas with recombination lines (p. ej., H<sub>2</sub>6α,H<sub>3</sub>6α) and derive velocity field among other parameters; and (iii) trace hot molecular gas (e.g., CH<sub>3</sub>OCHO) to measure rotation, in addition to quantifying the outflow. The goal is to move from a primarily morphological description to a coherent physical inventory—mass, ionized/molecular kinematics, and feedback—that consolidates UC1 as a test case for the hypothesis of disk-mediated accretion under strong feedback.

*Keywords:* Massive star formation; hypercompact H II regions; UC1; accretion disk.



## 1. Introducción

Comprender los procesos involucrados en la formación de estrellas implica considerar una gran cantidad de fenómenos a diferentes escalas y tiempos que hacen al problema tan complejo como el nivel de detalle que deseamos alcanzar. Si partimos del enfoque clásico (equilibrio hidrostático + simetría esférica), la presión de radiación limita la acreción desde valores muy inferiores a las masas que efectivamente se observan en las estrellas más masivas.

Superar esta barrera desde el punto de vista físico exige poner atención a la geometría y la dinámica. La evidencia indica que la acreción en estrellas masivas no es radial ni estacionaria. Esto significa que está organizada más hacia un disco que canaliza el transporte de material. En ese entorno coexisten acreción y fotoionización.

Este panorama se aborda combinando trazadores de gas ionizado y molecular, por ejemplo, en fases tempranas de la formación estelar masiva. En esos momentos comienza a emitirse radiación UV intensa que ioniza el gas circundante. A esta burbuja de gas ionizado le llamamos región HII. Cuando este proceso ocurre todavía muy cerca de la estrella y dentro de un medio muy denso, la

región ionizada es pequeña y compacta; dependiendo de su densidad puede catalogarse como región ultra o hiper compacta (UH II/HCH II). Estas regiones tienen un papel fundamental, pues registran la interacción entre el campo de radiación con el medio denso. En este ambiente, las líneas de recombinación (RRLs) permiten trazar mapas de velocidades y escenarios dinámicos como expansión, confinamiento o fotoevaporación.

En consecuencia, M17-UC1, constituye el caso de estudio central de este artículo. Es una región HCH II embebida en el frente de ionización entre la región extendida de M17 y la nube molecular densa de M17-SW. UC1 fue identificada en los años 80, pero hace solo unos pocos años, gracias a la mejora en resolución angular y sensibilidad de los observatorios espaciales y en Tierra, se han realizado avances importantes para comprender su morfología y naturaleza.

A continuación, enmarcado en mi trabajo de tesis doctoral en el Departamento de Astronomía de la Universidad de Guanajuato, presentamos una revisión cronológica, de los avances más significativos acerca de UC1. En la sección 2, abordaremos con un poco más de detalle el problema de la formación estelar masiva, y en la sección 3 analizamos el papel

diagnóstico de las regiones UCH II/HCH II en fases tempranas, enfatizando morfología, variabilidad y cinemática obtenida a partir de la obtención de RRLs.

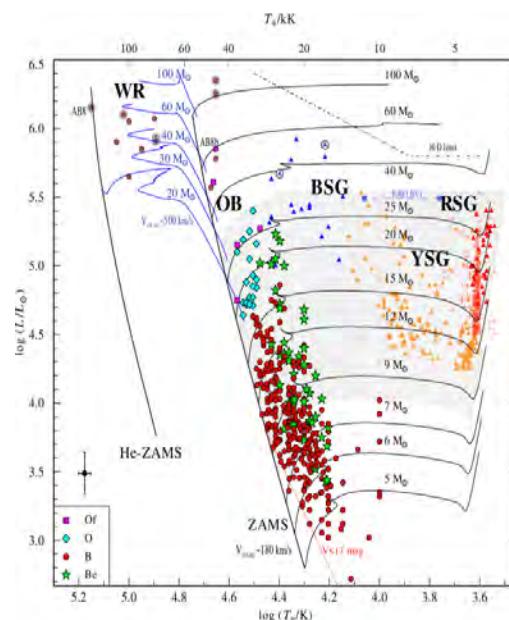
Finalmente, en la sección 4 presentamos una revisión de M17-UC1, sintetizando los resultados reportados a la fecha por diversos autores, con observaciones de radio e infrarrojo. Además, describimos parte de la metodología que estamos desarrollando con datos de ALMA para resolver la dinámica.

## 2. El problema de la formación estelar masiva.

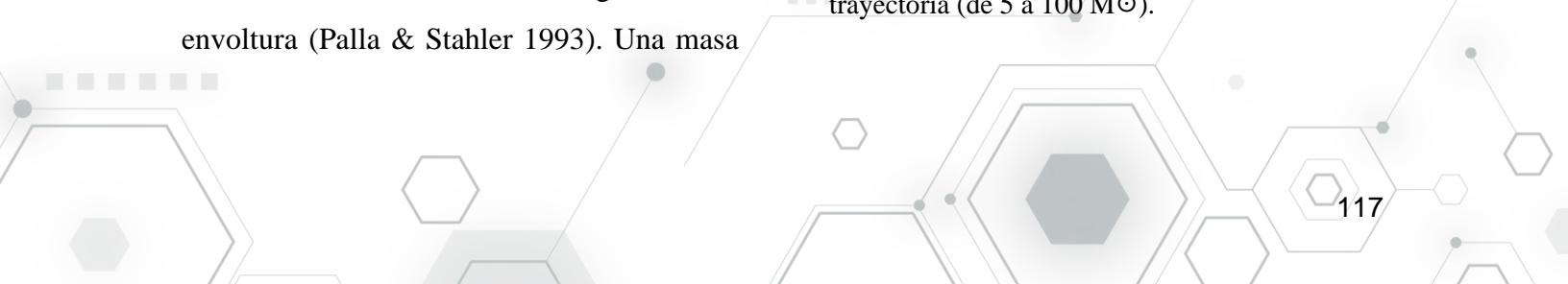
El proceso de formación estelar se puede delimitar a partir de la barrera de las  $8 M_{\odot}$ , marcando la división entre las estrellas de baja y alta masa. Esta distinción no es arbitraria y se fundamenta en una serie de fenómenos físicos subyacentes.

Entre los más relevantes encontramos el hecho de que las proto-estrellas con masas mayores a  $8 M_{\odot}$  alcanzan el punto cero de la secuencia principal (ZAMS, *Zero age main sequence*) de Hertzsprung-Russell (Figura 1), mientras continúan acretando gas de su envoltura (Palla & Stahler 1993). Una masa

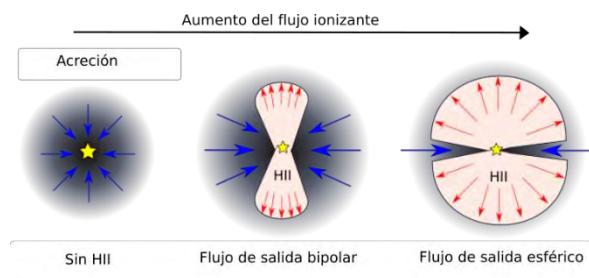
mayor a  $8 M_{\odot}$  tiene la energía suficiente para emitir fotones por encima del límite de Lyman (Panagia, 1973), permitiendo la formación de una región H II a su alrededor como se muestra en la Figura 2 (Draine, 2011).



**Figura 1.** Diagrama H-R para las estrellas masivas en la pequeña nube de Magallanes (SMC) realizado por V. Ramachandran, et.al 2019. Los puntos indican estrellas tipo O y B analizadas. Los pentágonos cafés son Wolf-Rajet WR, los triángulos amarillos, azules y rojos corresponden a supergigantes amarillas YSG, supergigantes azules BSG y supergigantes rojas RDG respectivamente. Las líneas negras indican los caminos evolutivos estándar para diferentes valores de masa inicial indicada en cada trayectoria (de 5 a  $100 M_{\odot}$ ).



El hecho que las protoestrellas masivas alcancen la secuencia principal antes de completar la acreción nos hace preguntarnos si este hecho conducirá a diferencias significativas en la formación y evolución respecto a las estrellas de baja masa. Físicamente, la presión de radiación creciente de la estrella masiva empuja el polvo circundante hacia afuera deteniendo la acreción (el flujo de gas y polvo que cae y alimenta a la protoestrella) y fijando un límite.



**Figura 2.** Esquema simplificado de la evolución de una región H II en el proceso de formación estelar masiva. A medida que crece la producción de fotones ionizantes, la región H II pasa de apagada a una expansión casi esférica, quedando la acreción confinada al plano de un disco. Inspirado en la secuencia analítica de Keto 2002, por Yucung Zhu (tres fases: quenched → bipolar → casi esférica)

Este límite se refiere a la condición en la que la aceleración radiativa hacia el exterior equilibra la gravedad hacia el interior (Eddington, 1926). La luminosidad de

Eddington equivale entonces al valor máximo de luminosidad que una estrella en equilibrio hidrostático puede tener y se representa como:

$$L_{Edd} = \frac{4\pi G M c}{\kappa} \approx 3.2 \cdot 10^4 \frac{M}{M_\odot} L_\odot$$

Donde  $M_\odot$  y  $L_\odot$  son respectivamente la masa y la luminosidad del Sol, la opacidad del material de la estrella es  $\kappa = \sigma_T \cdot m_p^{-1}$  donde  $\sigma_T$  es la sección transversal del electrón, y  $m_p$  es la masa del protón (Sanyal, 2015).

En una simetría esférica, y bajo un escenario isotrópico, la presión de radiación sobre los granos de polvo limita la formación de estrellas más masivas que  $40 M_\odot$  (Beuther y col., 2025). Investigaciones posteriores exploraron si cambios en la composición, el tamaño o la opacidad del polvo podrían permitir superar ese límite; sin embargo, en regiones de formación estelar típicas no se han observado variaciones de las propiedades del polvo lo bastante drásticas como para sostener esa vía. Otras aproximaciones se han centrado en estudiar el papel de los cúmulos en donde estas estrellas se forman (Bonnell & Bate, 2005; Bally & Zinnecker, 2005). Por ejemplo, en este escenario se contemplan



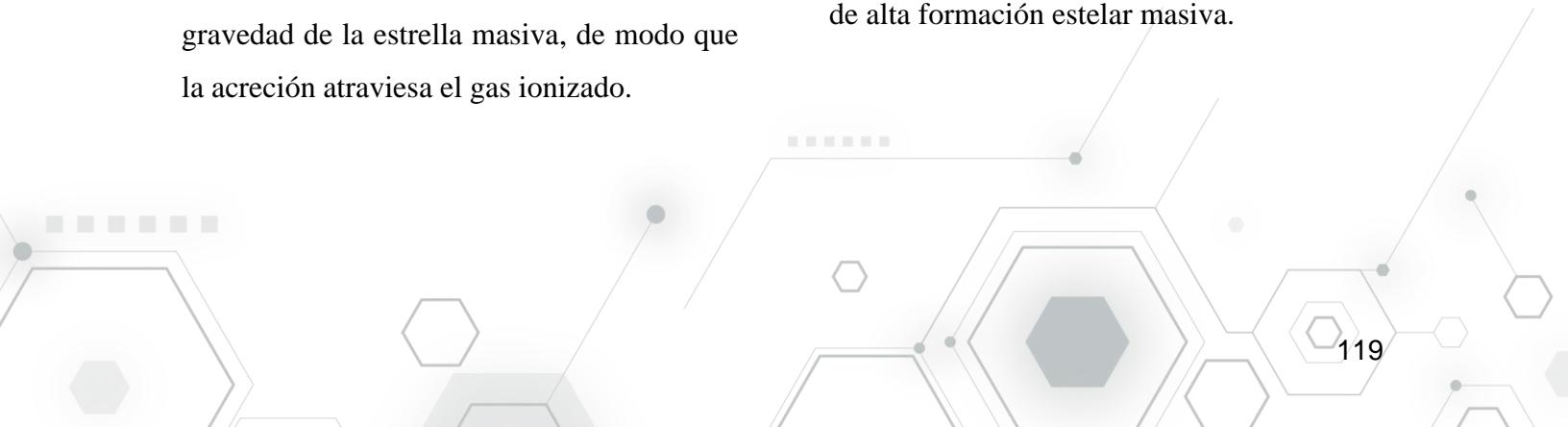
fusiones protoestelares, que pueden ocurrir, pero no parecen ser significativas para explicar la abundancia observada de estrellas masivas.

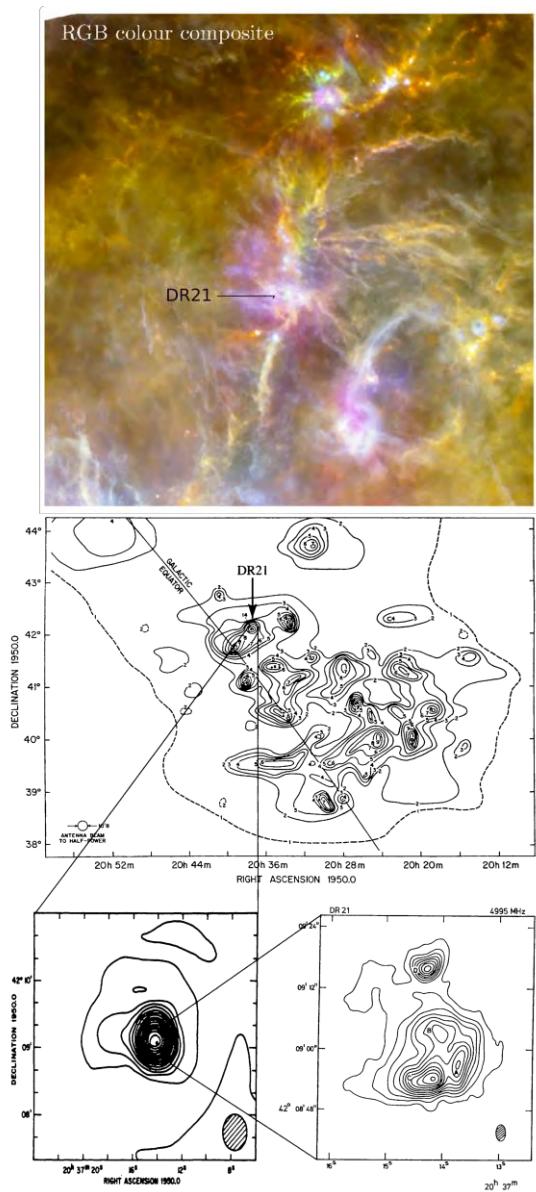
A la fecha, la evidencia observacional y teórica concuerda en que el proceso de acreción no puede ocurrir bajo una simetría esférica (Krumholz y col., 2009). Los modelos de acreción se han centrado en estudiar las propiedades de la formación de estrellas masivas en escenarios en los que hay presencia de discos protoestelares. En ellos, la presión de radiación se canaliza principalmente en las direcciones polares. Como la acreción se mantiene, se vuelve significativo el proceso de fotodisociación que afecta también al flujo de acreción.

Mientras avanza la fotodisociación y la emisión de fotones por parte de la protoestrella, a su alrededor se forma una región H II. Sus características dependen del momento evolutivo y la distancia a la que se encuentra el gas de la fuente: desde hipercompacta hasta ultracompactas, las primeras pueden quedar atrapadas por la gravedad de la estrella masiva, de modo que la acreción atraviesa el gas ionizado.

### 3. El papel de las regiones UCH II/HCH II en la formación estelar masiva

Cuando una fuente OB empieza a emitir suficientes fotones Lyman, el medio circundante alcanza un equilibrio entre ionizaciones y recombinaciones formándose una esfera de Strömgren (Strömgren, 1939). Allí, un volumen de Hidrógeno queda ionizado alrededor de una fuente OB cuando la tasa de ionizaciones iguala a la tasa de recombinaciones. Bajo estas condiciones aparecen las regiones UCH II/HCH II. Identificadas por primera vez en 1967 por Mezger et al., fueron descritas como regiones con tamaños de 0.06 a 0.4 pc y densidades de  $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ . Las UCH II quedan embebidas en regiones H II extendidas que tienen una menor densidad ( $\sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$ ) y tienen tamaños del orden de 10 pc. La primera región compacta reportada fue la DR21 (ver Figura 3) ubicada en la constelación de Cygnus-X (Downes, 1966). Posteriormente, gracias a observaciones en radio con el VLA, desde los años 80 comenzaron a identificarse un gran número de estos objetos en entornos de alta formación estelar masiva.





**Figura 3.** Arriba: Imagen del entorno DR21 en Cygnus X North compuesta en color RGB utilizando los mapas SPIRE 250  $\mu\text{m}$  (rojo), PACS 160  $\mu\text{m}$  (verde) y PACS 70  $\mu\text{m}$  (azul). (Hennemann, 2012). Abajo: Secuencia de radiocontornos que muestra una evolución de la visión de las regiones HCH II. La primera es una imagen de 5GHz de la región de Cygnus-X obtenida con un radiotelescopio de plato único

(haz de 10'.8), realizada por Downes & Rinehart (1966). La fuente DR21, indicada por la flecha, no estaba resuelta y fue la fuente más brillante detectada. A la izquierda la región DR21 observada a 1.4GHz con el Cambridge 1 Mile Array, donde la fuente sigue sin resolverse, pero el haz es más pequeño ( $34'' \times 23''$ ). Esta imagen resuelve el tamaño y la densidad lo cual permite clasificar a la región como “compacta”. Finalmente, a la derecha se observa el mismo campo con el Cambridge 5km Array cuya resolución es de  $3'' \times 2''$ . Con tal nivel de detalle, se revela la estructura dentro de la región compacta y se distinguen dos regiones UCH II.

Las regiones UCH II/HCH II no son visibles en el óptico ya que están embebidas dentro de nubes moleculares con extinciones que hacen opaca la luz visible (Roth y col., 2014). Para observarlas, se detectan, por un lado, las emisiones del continuo libre-libre y RRLs de Hidrógeno que se mapean a través de ondas de radio. Por ejemplo, los censos clásicos que se tienen de UCH II se realizaron usando el VLA a 2 – 6 cm (~5-15GHz) longitudes de onda donde el plasma suele ser ópticamente delgado, por lo que se pueden resolver morfologías. Por otro lado, las HCH II suelen ser ópticamente más gruesas incluso en longitudes de onda centimétricas. Por esta razón, se requieren observaciones en el milimétrico y submilimétrico ( $\geq 80-100$

GHz) donde la emisión libre-libre es más delgada y las RRLs trazan mucho mejor la cinemática del gas ionizado. Avances recientes en el desarrollo de la radioastronomía (VLA/ALMA entre otros), ha sido crucial para detallar la dinámica de estas regiones.

Complementariamente, el infrarrojo (IR) aporta diagnósticos clave del polvo y del gas parcialmente ionizado/neutral en entornos de alta extinción (Draine, 2011). En el IR cercano se mapea el gas ionizado y cavidades de outflow o discos en silueta, en el medio, el continuo de polvo cálido y con líneas la zona ionizada y la interfaz PDR.

Como las UCH II/HCH II aparecen en los procesos tempranos de formación estelar, su observación es crucial para diagnosticar la coexistencia entre acreción y los procesos impulsados por la radiación de la estrella (ionización, presión de radiación y fotoevaporación).

Si la expansión de la región H II fuera libre, la fase de UCH II sería mucho más corta, y no explicaría la abundancia de regiones observadas. Una de las hipótesis que se tienen hasta el momento es que la ionización queda confinada (o varía en tamaño), dependiendo de la interacción con el flujo de acreción.

(Wood & Churchwell 1989; Kurtz 2002; Churchwell 2002; Peters y col. 2010).

### *3.1. Avances desde lo observacional*

Los estudios recientes en radio han permitido: (i) establecer un catálogo morfológico para las regiones UCH II (Wood & Churchwell 1989). (ii) delimitar las diferencias observables entre ultra e hiper compactas (HCH II son ópticamente gruesas en centimétrico y requieren el régimen mm/submm para resolver su cinemática) (Johnson y col., 1998). (iii) Identificar la variabilidad de flujo y tamaño de estas regiones en rangos de años-décadas con estudios de observaciones multi-época (Galván-Madrid y col., 2011; De Pree y col., 2014). (iv) Observar emisión extendida asociada lo que puede apuntar a geometrías no esféricas y la existencia de un suministro continuo de material (p. ej., Kurtz y col., 1999; Povich y col., 2007).

### *3.2 Avances desde la teoría y simulaciones*

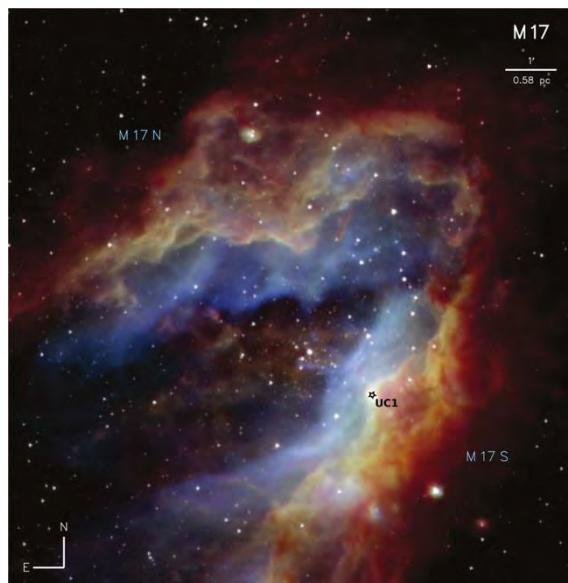
A partir de modelos de H II atrapadas gravitacionalmente se ha podido mostrar que la acreción continúa aun cuando la ionización

se enciende, siempre que el radio ionizado esté por debajo del radio gravitacional (Keto 2002; Keto 2003; Keto 2007). Además, simulaciones hechas con hidrodinámica y radiación, considerando ionización y calentamiento (por ejemplo, con FLASH), han reproducido morfologías observadas y *flickering* (oscilación de la H II entre estados compactos y extendidos a medida que fluctúa la tasa de acreción) (Peters y col., 2010; Galván-Madrid y col., 2011). El panorama actual converge en que parámetros como la no esfericidad, las variaciones de la tasa de acreción y el acoplamiento radiación-gas determinan el estado de la región H II (Peters y col., 2010; Zamora-Avilés y col., 2019).

#### 4. UC1, el nacimiento de una estrella masiva en M17

M17-UC1 es una región HCH II embebida en la zona suroeste de M17 (Figura 4). Fue identificada inicialmente como una UCH II cometaria por Felli et al 1980 e interpretada como ionizada por una probable fuente tipo B0–B0.5 en ZAMS dado su flujo Lyman modelado. Los primeros estudios de alta resolución se hicieron con VLA a partir de emisión en el continuo (1.3, 2, 6 y 21 cm). Estos revelaron que UC1 es una de las fuentes

de radio de M17 más prominentes (Felli y col., 1984, posteriormente Povich 2007) y confirmó que se sitúa en un frente de ionización, justo donde la densa nube molecular M17-SW es impactada por la región H II. Esto se evidencia por un frente de choque casi perpendicular a la línea de visión (Nielbock y col., 2007).



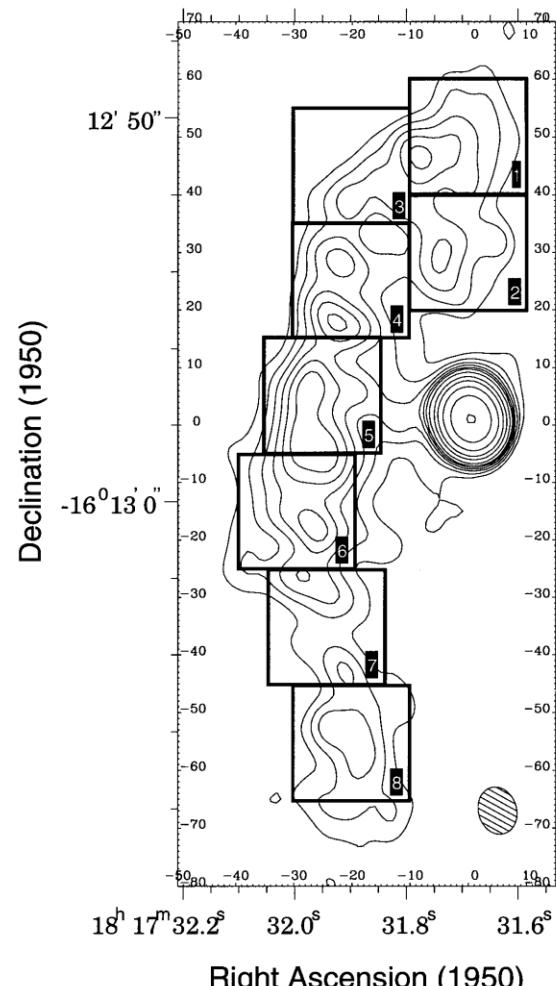
**Figura 4.** Imagen tricolor de un campo de  $\sim 10' \times 10'$  centrado en M17. El azul corresponde a la imagen SOFIA-FORCAST de 20  $\mu\text{m}$ , el verde a la imagen SOFIA-FORCAST de 37  $\mu\text{m}$  y el rojo a la imagen Herschel-PACS de 70  $\mu\text{m}$ . Superpuesta en blanco está la imagen Spitzer-IRAC de 3,6  $\mu\text{m}$ , que traza las estrellas reveladas dentro de M17. La estrella negra muestra la ubicación de UC1 dentro del frente de ionización. Tomado de: Lim y col., 2020.

Posteriormente, fue reclasificada como HCH II, a partir de la identificación de RRLs (H66 $\alpha$  a 1.3 cm y H52 $\alpha$  a 7 mm), y mediciones del continuo en radio. Estos nuevos datos permitieron resolver gradientes de velocidad ( $>35$  km/s) indicadores de dinámicas internas atribuidas a expansión o turbulencia (Johnson y col., 1998). Además de esto, el trabajo de Johnson et al. 1998 detalla la estructura de arco ionizado a  $\sim 0.01$  pc al este de UC1 (Figura 5) y detectan máseres de agua en sus cercanías, lo que confirma la actividad de formación estelar masiva en la región.

En el MIR (9.8, 10.53, 11.7 y 20.6  $\mu$ m), Kassis et al. (2002), define a UC1 como una fuente compacta no resuelta. Adicionalmente, a través de modelos de transferencia radiativa, concluyen que UC1 concuerda con una estrella central tipo B0 ZAMS, rodeada por un cascarón con  $R < 0.032$  pc y  $M = 0.6\text{--}3.4 M\odot$ , e infieren un posible disco pequeño y caliente para explicar el exceso en el NIR (que no fue cubierto por sus simulaciones).

Esto es complementario al trabajo de Nielbock (2007), quienes, a partir de observaciones en el NIR y MIR de mayor resolución, logran identificar por primera vez dos lóbulos en banda K separados  $0.46''$  ( $PA \approx 126^\circ$ ) con una franja oscura entre ellos,

morfología típica de discos en silueta. La luminosidad observada es compatible con una estrella B temprana.

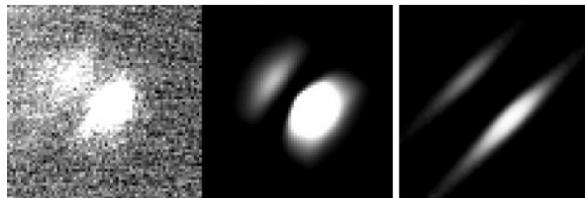


Right Ascension (1950)

**Figura 5.** Mapa de contornos del continuo a 1.3 cm (VLA) de la estructura en arco al este de M17-UC1. La imagen está en coordenadas B1950 y muestra, sobre el fondo de contornos del continuo, ocho subregiones numeradas marcadas con cajas de  $\sim 3'' \times 3''$  cada una. Las cajas indican dónde los autores promediaron el cociente línea/continuo de la H66 $\alpha$  para derivar a lo largo del arco, la velocidad LSR y temperatura

electrónica LTE corregida; los parámetros resultaron notablemente uniformes a lo largo de ~0.17 pc. En la esquina inferior derecha se indica el haz sintetizado de la imagen. Esta figura ilustra que la cinemática dominante del “Arc” es casi perpendicular a la línea de visión y sirve como base para el análisis comparativo con M17-UC1. Tomado de: Johnson y col., 1998.

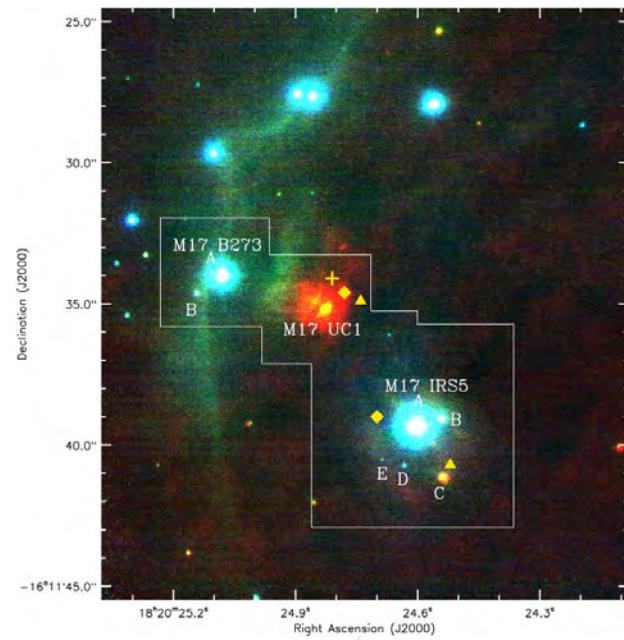
Los autores proponen un modelo 3D de una estrella ( $T_{\text{eff}} \approx 3 \times 10^4$  K) + disco de polvo (Figura 6) que reproduce la morfología descartando que la emisión esté dominada por paredes de cavidades de flujos de salida.



**Figura 6.** Ajuste del modelo M17-UC1. Izquierda: imagen original en banda Ks. Centro: modelo de disco inclinado a 30°. Derecha: imagen de luz dispersa a 2,2 mm de un filamento situado delante de una estrella B0. Tomado de Nielbock 2007.

Posteriormente, en 2015 Chen y colaboradores estudiaron con mejor resolución en el infrarrojo cercano (VLT/NACO), medio (VLT/VISIR) + espectroscopía integral de campo (VLT/SINFONI) los alrededores de UC1 con el objetivo de estimar las propiedades físicas

de los objetos estelares jóvenes y el entorno de formación estelar masiva (Figura 7). Los nuevos datos revelaron líneas espectrales nebulares en las inmediaciones de UC1 y resolvieron la fuente IRS 5 en 5 objetos estelares diferentes. Más específicamente, UC1 mostró nebulosidad de reflexión en K (2.2 μm) consistentes con dos lóbulos de luz divididos por una franja oscura, lo que confirma la existencia de un disco circumestelar visto casi de canto. La mayor parte de la emisión en el infrarrojo proviene de estos dos lóbulos pues la estrella central está oculta por la silueta del disco.



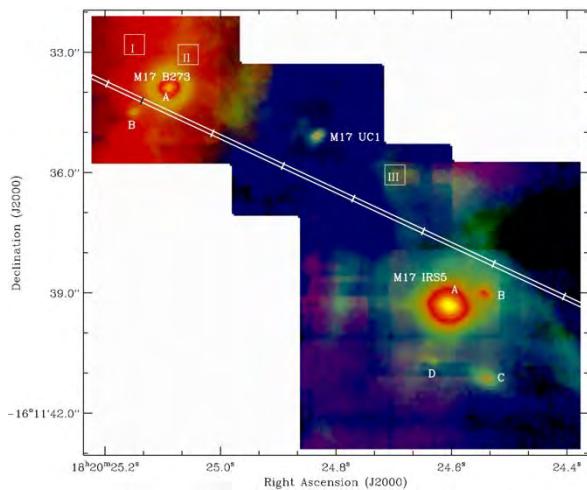
**Figura 7.** Imagen tricolor del PDR M 17 SW tomada por NACO con tres filtros de banda ancha del infrarrojo cercano (azul: H; verde: K; rojo: L), además el área de la espectroscopía de campo





integral SINFONI está delineada en el recuadro blanco. Se observan las etiquetas de las tres fuentes observadas por los autores en dicha región. En esta imagen compuesta también se incluyen tres tipos de máseres según sus coordenadas identificados en trabajos previos: Máseres de agua de 22 GHz (triángulos llenos, Caswell 1998; Johnson et al. 1998); máseres de metanol de clase II a 6,66 GHz (rombos llenos, Caswell et al. 1995, 2000); máseres de OH a 1,67 GHz (más grueso, Caswell 1998). Tomado de Chen y col., 2015.

Junto a esto la identificación de la línea de recombinación de Br  $\gamma$  (Figura 8) que exhibe una geometría extendida perpendicular al plano del disco, sugiere que el gas ionizado se está expendiendo preferencialmente a lo largo del eje polar del sistema.



**Figura 8.** Imagen tricolor creada a partir de la emisión (línea + continuo) de tres líneas del infrarrojo cercano (rojo: Br  $\gamma$  a 2,167  $\mu\text{m}$ , verde:

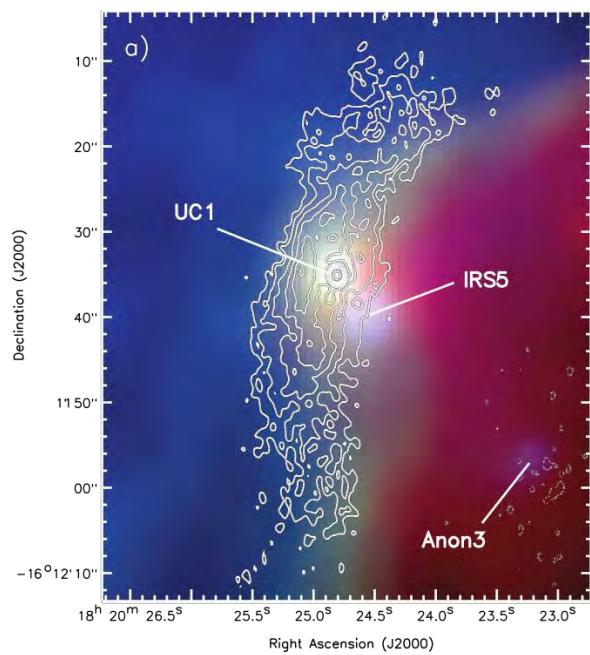
H2 1–0 S(1) a 2,122  $\mu\text{m}$ , azul: He I a 2,059  $\mu\text{m}$ ). Los tres cuadrados (I, II y III) marcan las posiciones seleccionadas que representan la región H II, el frente de ionización y el PDR. Tomado de Chen y col., 2015.

Las observaciones de línea de recombinación fueron enlazadas con mediciones de la emisión de H2 y polarización en el infrarrojo cerca de UC1, lo que arrojó evidencia de flujo bipolar, más específicamente un eje de eyeción sur norte, en donde solo el lóbulo sur es claramente visible en luz infrarroja dispersada y emisión de infrarrojo medio. El lóbulo opuesto parece estar suprimido por la presión externa del frente de ionización de M17 que envuelve la región, limitando la expansión del flujo de UC1 en esa dirección. La relación de intensidades de la emisión en H2 indica la presencia de gas molecular denso y caliente embebido en gas atómico más frío. Este trabajo propone que UC1 puede estar en fase de fotoevaporación/*outflow* dominante más que de acreción vigorosa.

Un análisis más reciente de la región realizado por Wanggi Lim y colaboradores, a partir de observaciones fotométricas con SOFIA/FORCAST (20 y 37  $\mu\text{m}$ ) y, combinando esa fotometría con Spitzer-IRAC y Herschel-PACS (Figura 4 y 9),



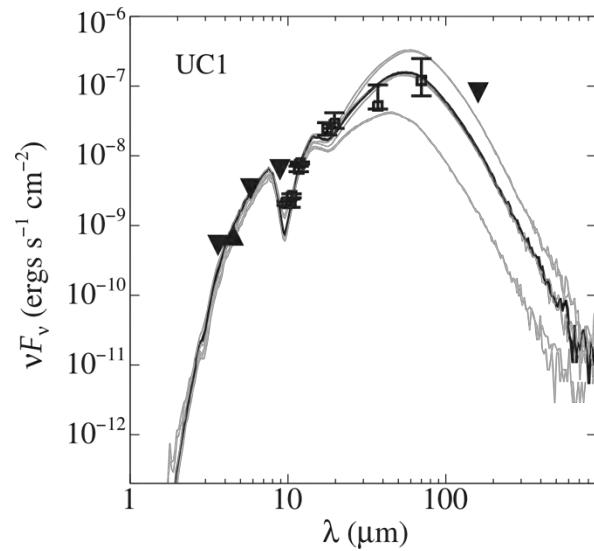
permittió construir la SED de UC1. Los datos fotométricos que fueron ajustados con modelos ZT (Zhang & Tan, 2011), arrojaron que UC1 exige una luminosidad bolométrica alta y una masa estelar elevada (mejor ajuste  $\sim 64 M\odot$ ; rango de mejores modelos  $\sim 48\text{--}64 M\odot$ ). Situándola como el MYSO más masivo del de la barra sur de M17.



**Figura 9.** Imagen RGB (azul: SOFIA 20  $\mu\text{m}$ ; verde: SOFIA 37  $\mu\text{m}$ ; rojo: Herschel 70  $\mu\text{m}$ ) contrastado en contornos con la emisión de radio continuo de 1,3 cm de Johnson et al. (1998). Esta emisión de radio muestra el pico brillante de UC1 incrustado en la emisión extendida de la estructura en forma de arco de radio. Tomada de Lim y col., 2020.

Para evitar sesgos por resolución y contaminación, trataron las bandas de baja

resolución como límites superiores, lo que estabiliza el ajuste en MIR–FIR (Figura 10). Estos resultados contrastan con estimaciones previas que asumen a UC1 con una estrella central tipo B0. Sin embargo, permiten acotar las condiciones de frontera para UC1 (luminosidad, masa, extinción) y son consistentes con su naturaleza de HCH II brillante en radio: la fuente ya impacta fuertemente su entorno, pero requiere confirmación dinámica (rotación y campo de velocidades) que estamos abordando con ALMA.



**Figura 10.** Ajuste SED con el modelo ZT usado para UC1. La línea negra es el modelo que mejor se ajusta, y las líneas grises son los ajustes restantes (ver Lim et al. 2020). Los triángulos invertidos son datos que se utilizan como límites superiores en los ajustes (para estos límites se usan las bandas con peor resolución o posible

contaminación). El modelo ZT (Zang & Tan) es un grid de transferencia raiativa 2D en el marco de un escenario de *Turbulent Core Accretion* que incluye la existencia de protoestrella+disco de acreción + envoltura en colapso + cavidades de *outflow* (Zhang & Tan 2011). Este modelo genera SEDs dependientes de masa estelar, tasa de acreción, inclinación, entre otros parámetros. Lim usa este grid para convertir la fotometría NIR–MIR–FIR en propiedades físicas como  $L_{bol}$ ,  $M\odot$  y  $A_\nu$ , seleccionando los mejores ajustes con un estadístico definido sobre los puntos que no son límites superiores.

#### 4.1 Nuestro proyecto:

Considerando los antecedentes y la necesidad de una confirmación dinámica, planteamos un plan de acción con ALMA: UC1 ofrece una oportunidad para estudiar la formación estelar masiva en un escenario muy dinámico. A su vez, persisten preguntas clave que orientan nuestro trabajo.

En concreto, nuestra investigación a partir de Observaciones con ALMA busca pasar de rastros morfológicos a mediciones físicas directas a partir de imágenes del orden de subarcosegundo. Así, UC1 puede estudiarse dinámicamente en sus escalas más críticas (cientos de AU). En el continuo, es posible discernir entre la emisión de polvo y libre-

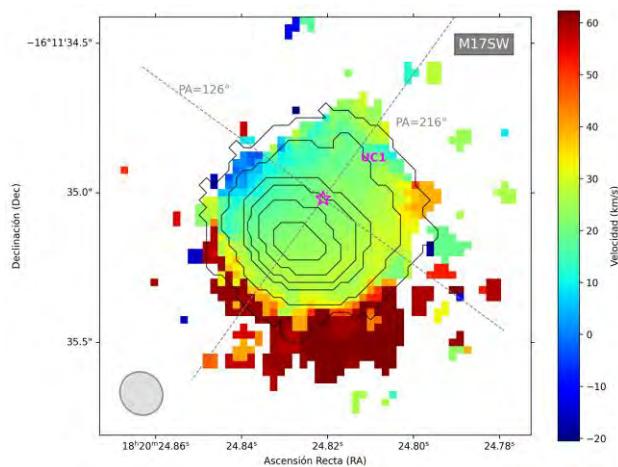
libre, separar el disco de la envoltura de la HCH II y estimar la masa superficial del disco evaluando su estabilidad. A partir de la obtención de RRLs es posible obtener el campo de velocidades del plasma y cuantificar la retroalimentación radiativa. Observando las moléculas es posible trazar el disco caliente y su rotación Kepleriana, lo que nos permitiría estimar una masa estelar dinámica.

Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 11, que corresponde al mapa de velocidad media ponderada por la intensidad (momento 1) que realizamos para la línea de recombinación H26α (~353.6 GHz, ALMA Band 7) hacia M17-UC1.

Evidenciamos un gradiente de velocidad bien ordenado que transita desde valores más azules al noreste/norte hacia valores más rojos al sur–suroeste, mientras que los contornos de la intensidad integrada (momento 0, con valores 0.9–0.4 del pico medido), delimitan una emisión compacta coincidente con la HCH II. Marcamos dos ejes de simetría ( $PA \approx 126^\circ$  y  $216^\circ$ ) extraídos de la morfología del continuo (Nielbock y col., 2007).

A primer orden, el gradiente cinemático es aproximadamente colineal con uno de esos

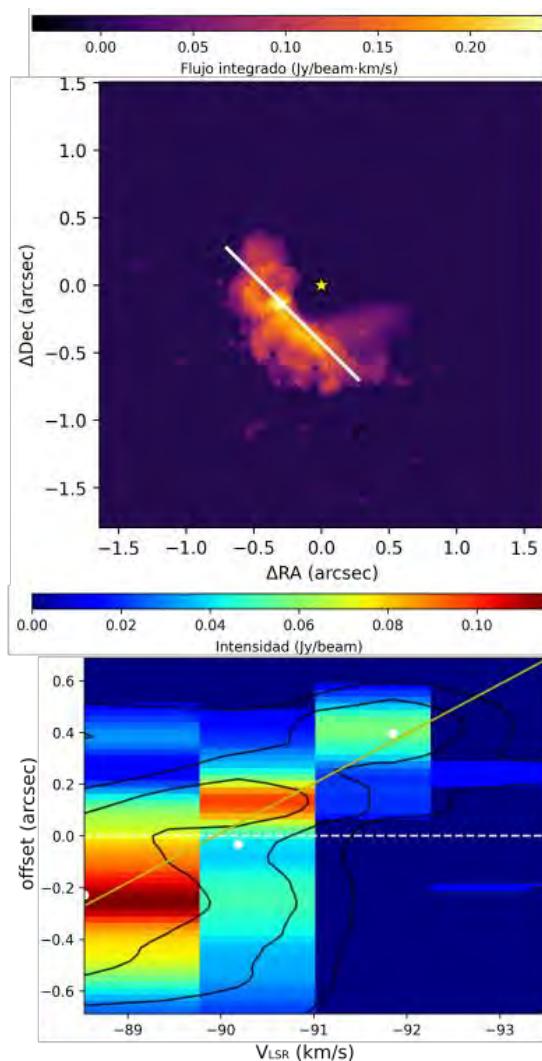
ejes, lo que es compatible con: (i) rotación o cizalla en una envoltura/ionosfera asociada al disco, o (ii) un flujo ionizado preferente (expansión/fotoevaporación) dirigido por la geometría disco–cavidad y el frente ionizante de M17. Esto se debe reforzar a partir de los mapas de dispersión de velocidades (momento 2) con tal de aislar el ensanchamiento dinámico de ensanchamiento por presión, y la confrontación con los gradientes moleculares (p. ej., CH<sub>3</sub>OCHO) a la misma resolución.



**Figura 11.** M17-UC1: ALMA/H26 $\alpha$ . Escala de colores: momento 1 (velocidad del centroide; barra a la derecha,  $\text{km s}^{-1}$ ). Los contornos corresponden al momento 0 (intensidad integrada) en fracciones del pico 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5 y 0.4. La estrella magenta marca la posición de UC1 (Yanza y col. 2022). Las líneas grises punteadas indican los ejes de simetría adoptados ( $\text{PA} \approx 126^\circ$  y  $216^\circ$ ). El haz sintetizado se muestra en la esquina inferior izquierda. El mapa revela un

gradiente cinemático noreste→suroeste superpuesto a una emisión integrada compacta, consistente con una posible rotación y/o flujo ionizado dirigido en el entorno inmediato de la HCH II.

En paralelo al análisis de la RRL, determinamos la cinemática molecular a partir de la identificación de CH<sub>3</sub>OCHO (formiato de metilo), un trazador típico de gas denso y caliente en entornos MYSO (Zapata y col., 2019, Bonfad y col., 2024). El momento 0 muestra una emisión compacta en torno a UC1 y, de forma más diagnóstica, el diagrama posición-velocidad a lo largo del eje  $\text{PA} \approx 126^\circ$  presenta un gradiente sistemático de velocidad que coincide en orientación con el gradiente visto en H26 $\alpha$  (Figura 12). Esta coherencia ionizado-molecular es consistente con una posible rotación en un disco/envoltura caliente que alimenta a la HCH II y, a la vez, deja abierta la existencia de una contribución de la expansión fotoionizada a lo largo del eje polar. Estos resultados son preliminares constituyen la línea base de un análisis dinámico más completo, en donde estamos incorporando análisis de los mapas de dispersión en las velocidades, el uso de otros trazadores moleculares y la comparación con modelos de transferencia radiativa.



**Figura 12.** cinemática molecular con ALMA/CH<sub>3</sub>OCHO (Band 7). Arriba: mapa de momento 0 (flujo integrado). La línea blanca indica el corte usado para el diagrama posición-velocidad (PA = 126°) y la estrella amarilla marca la posición de UC1. Abajo: diagrama posición-velocidad (PV) a lo largo del mismo corte. El mapa de color muestra intensidad y la línea amarilla es una guía de pendiente. Los puntos blancos señalan centroides espectrales por bin. El PV revela un gradiente con la misma orientación NE→SW que el observado en H26α (Figura 11),

aunque algo más pronunciado en el componente molecular, consistente con posible rotación en el gas caliente de la envoltura/disco, sin descartar contribuciones locales de dinámica ionizada cerca del centro.

Finalmente, haciendo un contraste entre las propiedades de UC1 con otras HCH II, observamos que los anchos de línea y gradientes de velocidad derivados aquí son compatibles con los reportados en fuentes análogas. Por ejemplo, en W49A se han medido líneas H recombinação con anchuras de 40–60 km s<sup>-1</sup> (Rugel y col., 2019). Estas similitudes sugieren que UC1 no es un caso excepcional, sino que se enmarca dentro de la diversidad cinemática típica de las HCH II que presentan acreción activa y retroalimentación radiativa en escalas de cientos de AU.

## 5. Conclusiones

M17-UC1 es una región de especial interés para estudiar la formación estelar masiva en su fase temprana: una HCH II embebida, con evidencia infrarroja de disco casi de canto y reflexión bipolar, RRLs anchas y una SED en infrarrojo que sugiere una fuente central de gran masa. La lectura conjunta de los trabajos

previos sugiere un escenario de protoestrella inflada con producción Lyman aún moderada, donde la retroalimentación empieza a regular el crecimiento. Nuestro interés con ALMA apunta a convertir esa imagen cualitativa en magnitudes físicas: (i) separar polvo/libre-libre en el continuo para medir la existencia y estabilidad del disco; (ii) usar RRLs (H26α/H36α) para cartografiar cinemática del plasma y discriminar rotación de expansión/fotoevaporación; (iii) trazar con moléculas calientes (p. ej., CH<sub>3</sub>OCHO) la existencia de rotación; y si es posible, (iv) cuantificar el *outflow* que ha sido previamente reportado (explorar o proponer observaciones de CO/SiO). Estos diagnósticos, integrados con la SED en IR, nos permitirán determinar el estado de acreción de UC1, y situarla en un contexto comparativo con otras HCH II. Con ello, el caso UC1 pasará de una caracterización morfológica a un inventario dinámico (masa, cinemática ionizada/molecular, estabilidad y retroalimentación) que robustece el paradigma de ensamblaje por disco bajo fuerte acoplamiento radiación-gas.

## Referencias bibliográficas

- Arthur, S. J., & Hoare, M. G. (2006). Hydrodynamics of cometary compact H II regions. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 165(2), 283–312. <https://doi.org/10.1086/503899>
- Bally, J., & Zinnecker, H. (2005). The birth of high-mass stars: Accretion and/or mergers? *The Astronomical Journal*, 129(5), 2281–2293. <https://doi.org/10.1086/429098>
- Beuther, H., Kuiper, R., & Tafalla, M. (2025). Star formation from low to high mass: A comparative view. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 63, 1–44. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-013125-122023>
- Bonfand, M., Csengeri, T., Bontemps, S., Brouillet, N., Motte, F. (2024). ALMA-IMF XI. The sample of hot core candidates: A rich population of young high-mass protostars unveiled by the emission of methyl formate. *Astronomy & Astrophysics*, 687, A163. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202347856>

- Bonnell, I. A., & Bate, M. R. (2005). Binary systems and stellar collisions: The role of mergers in massive star formation. *Monthly*



*Notices of the Royal Astronomical Society*,  
362(3), 915–920.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09360.x>

Caswell, J. L., Vaile, R. A., Ellingsen, S. P., Whiteoak, J. B., & Norris, R. P. (1995). Galactic methanol masers at 6.6 GHz. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 272(1), 96–138.

<https://doi.org/10.1093/mnras/272.1.96>

Caswell, J. L. (1998). Positions of hydroxyl masers at 1665 and 1667 MHz. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 297(2), 215–246.

<https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.01430.x>

Chen, Z., Goto, M., Henning, T., Stecklum, B., Linz, H., Fedele, D., & Sanna, A. (2015). VLT near- to mid-IR imaging and spectroscopy of the M 17 UC1–IRS 5 region. *Astronomy & Astrophysics*, 578, A82. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424895>

Churchwell, E. (2002). Ultra-compact H II regions and massive star formation. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 40, 27–62.

<https://doi.org/10.1146/annurev.astro.40.060401.093845>

De Pree, C. G., Wilner, D. J., Mercer, A. J., Davis, L. E., Goss, W. M., & Kurtz, S. (2014). Flickering of the ultracompact H II region in W49A. *The Astrophysical Journal*, 781(2), L36. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/781/2/L36>

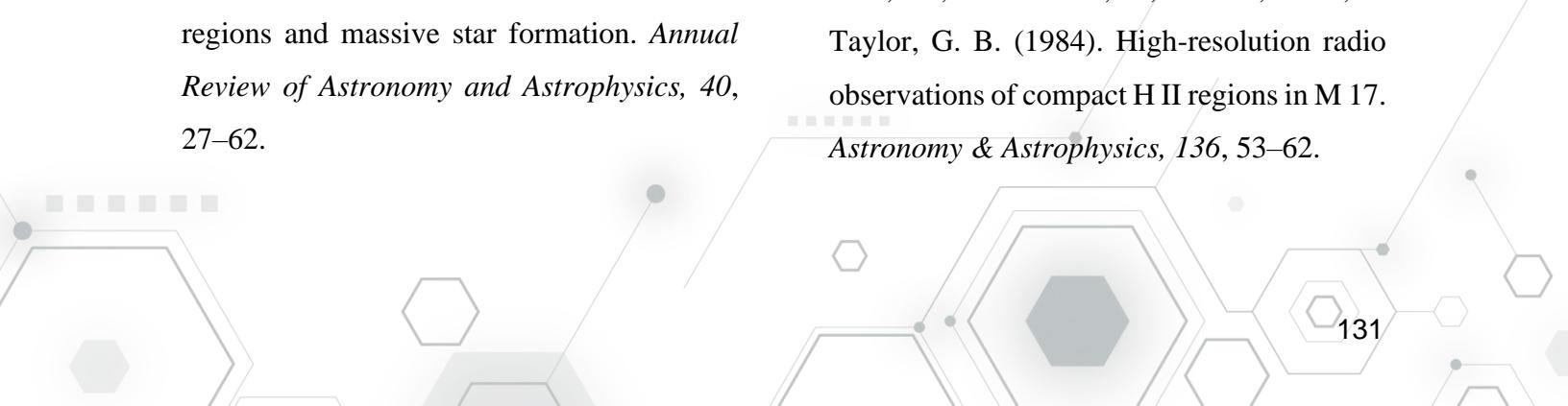
Downes, D., & Rinehart, R. (1966). Microwave Observations of the Cygnus X Region. *The Astrophysical Journal*, 144, 937–948.

Draine, B. T. (2011). *Physics of the interstellar and intergalactic medium*. Princeton University Press.

Eddington, A. S. (1926). *The internal constitution of the stars*. Cambridge University Press.

Felli, M., Johnston, K. J., & Churchwell, E. (1980). An unusual radio point source in M17. *The Astrophysical Journal Letters*, 242, L157–L161.

Felli, M., Churchwell, E., Wilson, T. L., & Taylor, G. B. (1984). High-resolution radio observations of compact H II regions in M 17. *Astronomy & Astrophysics*, 136, 53–62.



Galván-Madrid, R., Peters, T., Keto, E., Mac Low, M.-M., Banerjee, R., & Klessen, R. S. (2011). Time variability in simulated ultracompact and hypercompact H II regions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 416(2), 1033–1044. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19101.x>

Haemmerlé, L., Eggenberger, P., Meynet, G., Maeder, A., & Charbonnel, C. (2017). Massive star formation by accretion. I. Evolution in the Hertzsprung–Russell diagram. *Astronomy & Astrophysics*, 602, A17. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629635>

Hennemann, M., Motte, F., Schneider, N., et al. (2012). Filaments in the massive star-forming complex M 17 revealed by *Herschel*. *Astronomy & Astrophysics*, 543, L3. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219171>

Hosokawa, T., & Omukai, K. (2009). Evolution of massive protostars with high accretion rates. *The Astrophysical Journal*, 691(1), 823–846. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/691/1/823>

Hosokawa, T., Yorke, H. W., & Omukai, K. (2010). Evolution of massive protostars: Via disk accretion. *The Astrophysical Journal*, 721(1), 478–492. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/721/1/478>

Johnson, C. O., De Pree, C. G., & Goss, W. M. (1998). A high-resolution VLA study of M17-UC1. *The Astrophysical Journal*, 500, 302–310. <https://doi.org/10.1086/305717>

Kahn, F. D. (1974). Cocoons around early-type stars. *Astronomy & Astrophysics*, 37, 149–162.

Kassis, M., Deutsch, L. K., Campbell, M. F., Hora, J. L., Fazio, G. G., & Hoffmann, W. F. (2002). Mid-Infrared Observations of M17. *The Astronomical Journal*, 124(3), 1636–1649. <https://doi.org/10.1086/341819>

Keto, E. (2002). On the Evolution of Ultracompact H II Regions. *The Astrophysical Journal*, 580(2), 980–986. <https://doi.org/10.1086/343794>

Keto, E. (2007). The Formation of Massive Stars: Accretion, Disks, and the Development of Hypercompact H II Regions. *The Astrophysical Journal*, 666, 976–981. <https://doi.org/10.1086/520320>

Krumholz, M. R., Klein, R. I., McKee, C. F., Offner, S. S. R., & Cunningham, A. J. (2009). The formation of massive star systems by accretion. *Science*, 323(5915), 754–757. <https://doi.org/10.1126/science.1165857>

Kurtz, S. (2002). Ultracompact H II Regions. Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, Serie de Conferencias, 12, 16–21.

Lim, W., & De Buizer, J. M. (2019). Surveying the Giant H II Regions of the Milky Way with SOFIA. I. W51A. *The Astrophysical Journal*, 873, 51. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0288>

Lim, W., De Buizer, J. M., & Radomski, J. T. (2020). Surveying the Giant H II Regions of the Milky Way with SOFIA. II. M17. *The Astrophysical Journal*, 888, 98. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab5fd0>

McKee, C. F., & Tan, J. C. (2003). The formation of massive stars from turbulent cores. *The Astrophysical Journal*, 585(2), 850–871. <https://doi.org/10.1086/346149>

Mezger, P. G., Schraml, J., & Terzian, Y. (1967). *A new class of compact H II regions associated with OH emission sources*. The Astrophysical Journal Letters, 150, L157–L161.

Nielbock, M., Chini, R., Hoffmeister, V. H., Scheyda, C. M., Steinacker, J., Nürnberger, D., & Siebenmorgen, R. (2007). The Morphology of M17-UC1: A Disk Candidate Surrounding a Hypercompact H II Region. *The Astrophysical Journal Letters*, 656(2), L81–L84. <https://doi.org/10.1086/512972>

Panagia, N. (1973). Some physical parameters of early-type stars. *The Astronomical Journal*, 78(9), 929–934. <https://doi.org/10.1086/111518>

Peters, T., Mac Low, M.-M., Banerjee, R., Klessen, R. S., & Dullemond, C. P. (2010). Ionization feedback in massive star formation. *The Astrophysical Journal*, 711(2), 1017–1028. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/711/2/1017>

Povich, M. S., Benjamin, R. A., Whitney, B. A., Babler, B. L., Indebetouw, R., Meade, M. R., & Churchwell, E. (2007). A multiwavelength study of M17: The spectral energy distribution and PAH emission morphology of a massive star formation region. *The Astrophysical Journal*, 660(1), 346–362. <https://doi.org/10.1086/513073>

Palla, F., & Stahler, S. W. (1993). The pre-main-sequence evolution of intermediate-

mass stars. *The Astrophysical Journal*, 418, 414–425.

Roth, N. (2014). The dynamics of ultracompact H II regions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 438(2), 1335–1354.

<https://doi.org/10.1093/mnras/stt2278>

Rugel M. R., Rahner D., Beuther H., Pellegrini E. W., Wang Y., Soler J. D., Ott J., Brunthaler A., Anderson L. D., Mottram J. C. (2019). *Feedback in W49A diagnosed with Radio Recombination Lines and Models*. *Astronomy & Astrophysics*, 627, A168. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834068>

Sanyal, D., Grassitelli, L., Langer, N., & Bestenlehner, J. M. (2015). Massive main-sequence stars approaching the Eddington limit. *Astronomy & Astrophysics*, 580, A20. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525945>

Wood, D. O. S., & Churchwell, E. (1989). The morphologies and physical properties of ultracompact H II regions. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 69, 831–895. <https://doi.org/10.1086/191329>

Yanza, V., Masqué, J. M., Dzib, S. A., Rodríguez, L. F., Medina, S.-N. X., Kurtz, S., Loinard, L., Trinidad, M. A., Menten, K. M., & Rodríguez-Rico, C. A. (2022). The Population of Compact Radio Sources in M17. *The Astronomical Journal*, 163(6), 276. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac67ec>

Zamora-Avilés, M., Vázquez-Semadeni, E., González, R. F., Franco, J., Shore, S. N., Hartmann, L. W., Ballesteros-Paredes, J., Banerjee, R., & Körtgen, B. (2019). Structure and expansion law of H II regions in structured molecular clouds. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 487(2), 2200–2214.

<https://doi.org/10.1093/mnras/stz1235>

Zhang, Y., & Tan, J. C. (2011). Radiative Transfer of Models of Massive Star Formation. I. Dependence on Basic Core Properties. *The Astrophysical Journal*, 733, 55. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/733/1/55>

Zapata, L. A., Ho, P. T. P., Fernández-López, M., Sánchez-Monge, Á., Rodríguez, L. F., Palau, A., Garay, G., & Moriarty-Schieven, G. H. (2019). An Asymmetric Keplerian Disk Surrounding the O-type Protostar IRAS 16547-4247. *The Astrophysical Journal*, 879(2), 134. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab0a2c>

872(2), 176. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aafedf>

