

ESTRELLAS MASIVAS: LO QUE LA QUÍMICA REVELA SOBRE SU FORMACIÓN

M. A Trinidad ^{a,*}

^a Universidad de Guanajuato, Departamento de Astronomía, Callejón de Jalisco S/N, Col. Valenciana,
C.P. 36240, Guanajuato, Gto., México. Correo: trinidad@ugto.mx

Resumen

La formación de estrellas masivas es uno de los procesos más complejos en la evolución del Universo, y su comprensión sigue siendo un desafío crucial. La astroquímica —estudio de las moléculas en el medio interestelar— se ha consolidado como una herramienta clave para investigar las etapas tempranas de este proceso. Gracias al análisis de las líneas espectrales, las moléculas revelan una diversidad de compuestos químicos en regiones de formación estelar. En este artículo presentamos un estudio sobre el contenido molecular de objetos estelares jóvenes masivos y regiones H II ultracompactas, basado en observaciones con el radiotelescopio IRAM de 30 metros. Este análisis permite explorar las condiciones físicas y químicas del entorno donde se forman las estrellas masivas, evaluando cómo la química revela información clave sobre su origen y evolución.

Palabras clave: Astroquímica; Medio interestelar; Moléculas; Formación de estrellas.

MASSIVE STARS: WHAT CHEMISTRY REVEALS ABOUT THEIR FORMATION

Abstract

The formation of massive stars is one of the most complex processes in the evolution of the Universe, and its understanding remains a crucial challenge. Astrochemistry —the study of molecules in the interstellar medium— has become a key tool for investigating the early stages of this process. Through the analysis of spectral lines, molecules reveal a diverse range of chemical compounds in star-forming regions. In this article, we present a study on the molecular content of massive young stellar objects and ultracompact HII

regions, based on observations with the IRAM 30-meter radio telescope. This analysis allows us to explore the physical and chemical conditions of the environment where massive stars are formed, evaluating how chemistry reveals key information about their origin and evolution.

Keywords: Astrochemistry; Interstellar medium; Molecules; Star formation.

1. Introducción

Todas las estrellas, independientemente de su masa, se forman en el interior de nubes moleculares mediante el colapso gravitacional de fragmentos densos. Este proceso es intrínsecamente complejo y se desarrolla en múltiples escalas espaciales y temporales, requiriendo una descripción física detallada (Shu y col., 1987), (Motte y col., 2018). Dado que las nubes moleculares están compuestas por gas y polvo, la observación directa de su interior es imposible en longitudes de onda visibles. Por ello, la mayor parte del conocimiento actual sobre la formación estelar proviene de observaciones en el infrarrojo y radio, donde el polvo es transparente y es posible detectar los detalles espectrales muy al interior de las nubes.

La astroquímica, también llamada astrofísica molecular, surge como una disciplina híbrida entre la química y la astronomía. Su objetivo es comprender la formación, evolución y

destrucción de moléculas en entornos cósmicos diversos: desde las frías nubes moleculares y las regiones de formación estelar hasta el medio interestelar de galaxias distantes (van Dishoeck, 2018). Su importancia es múltiple: permite entender mejor la física de estos entornos, la evolución química del Universo e incluso ofrece pistas sobre el origen de la vida.

Actualmente se han detectado más de 300 especies moleculares en el espacio, además de sus isotopólogos -versiones moleculares donde uno o más átomos han sido reemplazados por sus isótopos estables, como el ^{13}CO en lugar del ^{12}CO estándar. Si bien el hidrógeno molecular (H_2) es la molécula más abundante, seguida del monóxido de carbono (CO), otras especies como OH , H_2O , NH_3 , SiO y CH_3OH también son comunes. La formación de moléculas en el espacio ocurre bajo condiciones extremadamente distintas a las terrestres: densidades bajísimas ($\sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$) y temperaturas de apenas $\sim 10 \text{ K}$ en nubes

moleculares, frente a condiciones más calientes y densas ($\sim 10^3$ – 10^5 cm⁻³ y $\sim 10^4$ K) en regiones H II. Estas condiciones extremas permiten la formación de moléculas que sería prácticamente imposible de sintetizar en laboratorios terrestres.

El objetivo principal de este trabajo es identificar posibles firmas químicas que distingan las diferentes etapas evolutivas del proceso de formación de estrellas masivas. Este artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta el contexto de la formación estelar desde el punto de vista de la astroquímica. En la Sección 3 se dan los resultados de las transiciones moleculares detectadas y en la Sección 4 se presentan las principales conclusiones.

2. Astroquímica en Regiones de Formación Estelar Masiva

El proceso de formación de estrellas de baja masa (con masas menores a 8 veces la masa del Sol) está relativamente bien comprendido, existiendo buena concordancia entre modelos teóricos y observaciones. El modelo clásico de Shu, Adams y Lizano (1987) describe este proceso en varias fases: colapso en caída libre, formación de un flujo bipolar y un disco

circunestelar, y finalmente la formación de la estrella.

Sin embargo, el caso de las estrellas masivas ($M > 8 M_{\odot}$) es mucho más complejo. Aunque representan una fracción menor del total estelar, su impacto es enorme. Estas estrellas enriquecen el medio interestelar con elementos pesados, desencadenan nueva formación estelar y modifican su entorno mediante intensa radiación y vientos estelares, hasta la eventual explosión como supernovas. Por tanto, regulan procesos fundamentales en la evolución de las galaxias.

El estudio de la formación de estrellas masivas presenta desafíos teóricos y observacionales. Entre los últimos podemos citar que se forman en cúmulos de estrellas densos y lejanos, evolucionan rápidamente y requieren alta resolución angular y sensibilidad para ser observadas (Trinidad y col., 2003). Diversas revisiones Tan y col. (2014), Motte y col. (2018), Urquhart, (2024) proponen un esquema evolutivo general para la formación estelar de alta masa (FEAM), que incluye las siguientes etapas: 1. Núcleo frío en colapso, originado por una inestabilidad gravitacional de un fragmento molecular; 2. Núcleo molecular caliente, estructura compacta químicamente rica; 3.

Objeto estelar joven masivo (OEJM), con fuerte aglutinamiento de material por atracción gravitacional y flujos bipolares; y 4. Región HII Hipercompacta y Ultracompacta (RHIIU); la estrella central ioniza el hidrógeno de su entorno.

La composición química de las regiones de FEAM también evoluciona a través de diferentes etapas (Jørgensen y col., 2020). En las fases tempranas, las moléculas se

congelan sobre granos de polvo formando mantos de hielo. A medida que la protoestrella evoluciona, calienta su entorno y las moléculas se subliman, incrementando la complejidad química observable. Posteriormente, la intensa radiación UV puede destruir moléculas. Por tanto, se espera un patrón de riqueza química que crece, alcanza un máximo y luego disminuye, como se ilustra en la Figura 1.

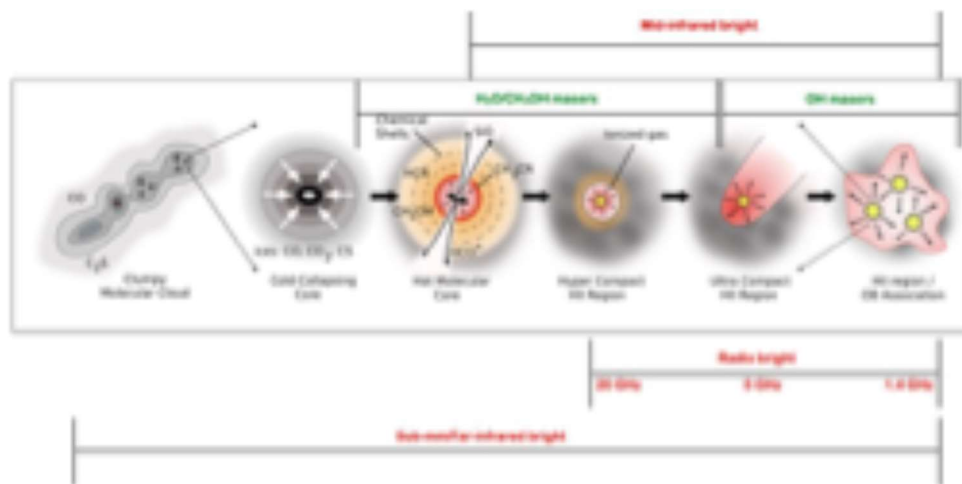


Figura 1. Esquema evolutivo del proceso de formación de estrellas masivas Fuente: Urquhart (2024)

En este marco, los OEJMs —fases intermedias del FEAM— deberían presentar una mayor riqueza molecular que las RHIIUs. Así, la astroquímica emerge, así como una herramienta poderosa que, por un lado, permite explorar las diferencias químicas entre las etapas evolutivas de estas estrellas y validar modelos teóricos, y por

otro, investiga las condiciones físicas de los entornos donde se forman estos objetos estelares masivos.

La presencia, abundancia relativa y distribución espacial de diversas especies moleculares proporcionan claves sobre las condiciones físicas y los procesos químicos que ocurren en el proceso de FEAM. En este

sentido, la detección de transiciones moleculares permite inferir propiedades fundamentales del gas, como son su temperatura, densidad, cinemática y composición. Algunas moléculas actúan como trazadores de etapas evolutivas específicas (Sanhueza y col., 2012), mientras que otras permiten identificar procesos como choques. Es decir, el contenido molecular del medio interestelar no solo es una consecuencia pasiva del entorno, sino que también refleja la historia evolutiva de las regiones de formación estelar. Por tanto, un estudio sistemático de líneas moleculares en distintas etapas del proceso de formación estelar puede contribuir significativamente a validar, refinar o cuestionar los modelos evolutivos propuestos.

3. Detección de Transiciones Moleculares

Para explorar el contenido molecular en regiones de formación estelar masivas, se utilizaron observaciones espectroscópicas sensitivas obtenidas con el radiotelescopio IRAM 30m, ubicado en Pico Veleta, España (para una descripción detallada ver Trinidad y col. (2025)). Este instrumento opera en longitudes onda milimétricas, ideales para

estudiar y caracterizar una gama de transiciones moleculares.

La muestra estudiada incluye 95 fuentes: 32 de ellas clasificadas como OEJMs y 63 como RHIIUs. Parte de las observaciones realizadas cubren el rango de frecuencias entre 85.8 y 89.8 GHz (estas frecuencias corresponden aproximadamente a longitudes de onda de unos 3 mm), un intervalo espectral dominado por líneas de especies moleculares simples que permiten evaluar las diferencias químicas entre OEJMs y RHIIUs.

Para la identificación de las transiciones moleculares detectadas se utilizaron las bases de datos Cologne Database for Molecular Spectroscopy (CDMS, 2024)

y Jet Propulsion Laboratory Molecular Spectroscopy Database (Jet Propulsion Laboratory Molecular Spectroscopy Database, s.f.), consideradas las más completas; además de proporcionar los parámetros espectroscópicos necesarios para el cálculo de la densidad columnar (una magnitud que representa el número total de partículas por unidad de área a lo largo de la línea de visión entre nosotros y el objeto observado).

Los espectros de las fuentes observadas revelaron una notable diversidad de transiciones moleculares, típicas de regiones

de formación estelar masiva. En este intervalo de frecuencia se identificaron 25 transiciones moleculares, las cuales se clasificaron en dos grupos según su tasa de detección: aquellas detectadas en más del 50% de las fuentes de la muestra (Grupo 1) y las presentes en menos del 50% (Grupo 2). La distribución de transiciones del Grupo 1 se ilustra en la Figura 2.

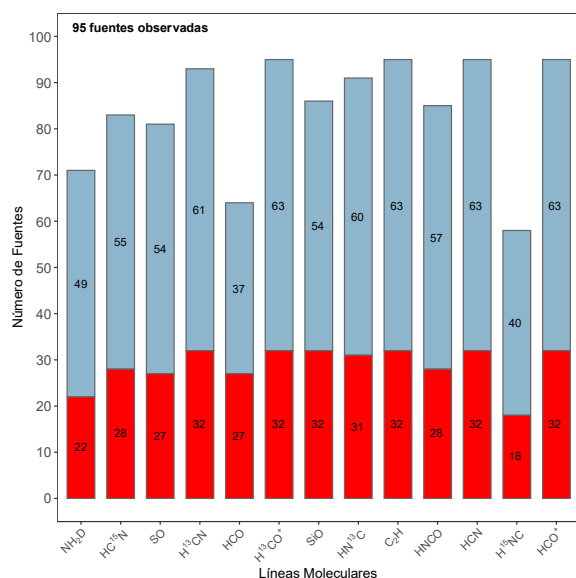


Figura 2. Transiciones moleculares detectadas en más del 50% de las fuentes de la muestra (Grupo 1). El color rojo corresponde a las RHIIUs y el azul a los OEJMs.

Dentro del Grupo 1 se identificaron 13 transiciones moleculares, donde las especies H¹³CO⁺, C₂H, HCN, y HCO⁺ se detectaron en todas las fuentes de la muestra. De estas, el HCO⁺ es la línea más intensa. Otras transiciones detectadas dentro del Grupo 1 son las moléculas HC¹⁵N, SO, H¹³CN, SiO,

HN¹³C y HNCO. Por el contrario, las líneas más comunes del Grupo 2 son las correspondientes a HC₅N y CCS. En la Figura 3 se muestra un conjunto de espectros de OEJMs y RHIIUs.

La inspección de las transiciones moleculares detectadas en el intervalo de 85.8 a 89.8 GHz indica que los espectros de los OEJMs y las RHIIUs en la muestra son notablemente similares. Más aún, al analizar la tasa de detección de las transiciones moleculares, no se encontraron diferencias significativas entre ambos tipos de fuentes para las transiciones del Grupo 1.

El ancho de línea proporciona información sobre la velocidad del gas. El análisis del ancho de línea mostró que en promedio es menor a 7.5 km s⁻¹. El SiO, conocido por trazar flujos bipolares, exhibe anchos de hasta 23 km s⁻¹, como es esperado dado que esta molécula traza gas en regímenes de alta velocidad. En promedio, las OEJMs presentan líneas ligeramente más anchas que las RHIIUs, lo que podría indicar movimientos de alta velocidad más prominentes en OEJMs, aunque las diferencias generales no son drásticamente significativas. Esta similitud plantea la cuestión de si procesos físicos similares están

ocurriendo en ambas etapas a pesar de sus diferencias evolutivas.

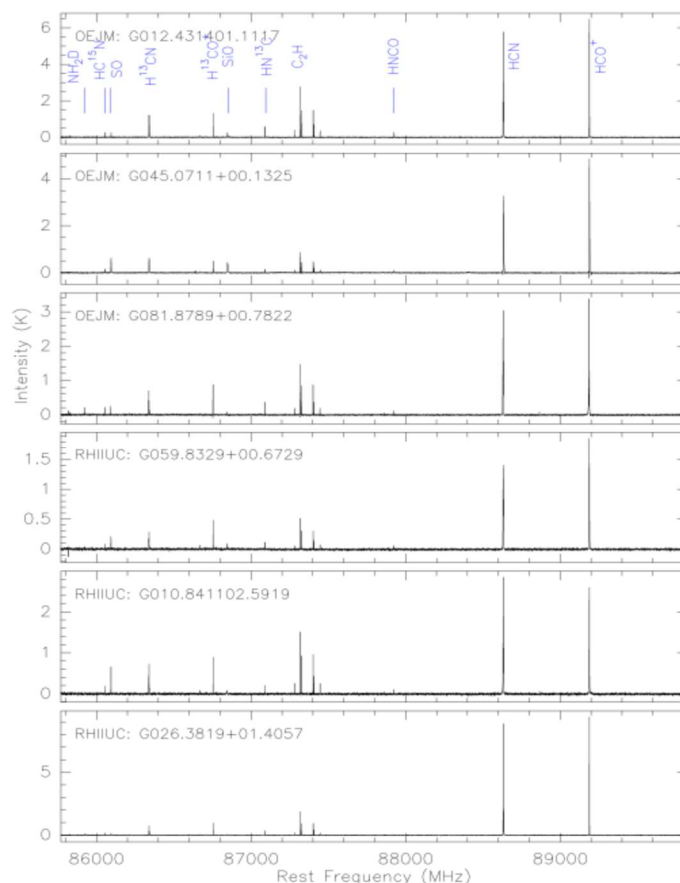


Figura 3. Espectros en el intervalo de frecuencia de 85.9 a 89.8 GHz de un conjunto de OEJMs y RHHUs.

Para cuantificar el contenido molecular, se calcularon densidades columnares para las transiciones del Grupo 1. Para su cálculo se realizaron las siguientes suposiciones: equilibrio termodinámico local (LTE), líneas ópticamente delgadas y todas las transiciones comparten una misma temperatura de excitación (supuesta igual a la temperatura cinética del amoníaco (Urquhart y col.,

2011)). Además, se supuso homogeneidad espacial del gas dentro del haz del telescopio, una simplificación necesaria ante la imposibilidad de resolver espacialmente las regiones con una sola antena.

Los valores de densidad columnar obtenidos abarcan un intervalo amplio, desde $\sim 10^{11}$ hasta $\sim 10^{17}$ cm⁻². HNCO presentó la mayor

densidad columna, mientras que HC15N la menor.

Los resultados del análisis del contenido molecular en los OEJMs y RHIIUs de la muestra sugieren que, al menos para las transiciones moleculares más comunes y bajo las condiciones de observación actuales, no existe una transición química abrupta entre OEJMs y RHIIUs, como predicen algunos modelos. Se encontró una similitud en la tasa de detección y la densidad de líneas moleculares. No se observaron diferencias significativas en la intensidad de las líneas.

En cuanto a los perfiles de línea (ancho), estos muestran una correlación pobre entre especies, aunque los OEJMs tienden a exhibir líneas ligeramente más anchas. Por último, la distribución de densidades columnares es comparable en ambos tipos de fuentes.

Estos hallazgos van en contra de la visión tradicional de la evolución química en las regiones de formación de estrellas masivas, que predice una evolución química más marcada entre las diferentes etapas. Contrario a la expectativa de una rica química en OEJMs que disminuye en la etapa de UCHII, los resultados sugieren que el proceso evolutivo químico podría ser más continuo de lo que se pensaba, al menos para

las especies más comunes y para la muestra estudiada.

4. Conclusiones

A partir del análisis de 95 regiones de formación estelar observadas con el radiotelescopio IRAM 30m en el rango de 85.8–89.8 GHz, se concluye que:

- No se observan diferencias significativas en la densidad de líneas, intensidad ni densidad columnar entre OEJMs y UCHIIs.
- Las similitudes químicas entre estas dos etapas evolutivas cuestionan la idea de una transición marcada en la composición molecular durante el proceso de formación estelar masiva.

Estos resultados sugieren que la evolución química podría ser más continua de lo previsto. No obstante, se requieren observaciones con mayor resolución angular y sensibilidad para confirmar estas conclusiones y estudiar con mayor detalle la química en la formación de estrellas masivas.

Referencias bibliográficas

CDMS (2024). *The Cologne Database for Molecular Spectroscopy*.

<https://cdms.astro.uni-koeln.de/>

Jørgensen, J. K., Belloche, A., & Garrod, R. T. (2020). *Astrochemistry During the Formation of Stars*. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 58, 727–778.

Jet Propulsion Laboratory Molecular Spectroscopy Database (s.f.).
<https://spec.jpl.nasa.gov/>

Motte, F., Bontemps, S., & Louvet, F. (2018). *High-Mass Star and Massive Cluster Formation in the Milky Way*. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56, 41–82.

Sanhueza, P., Jackson, J. M., Foster, J. B., Garay, G., Silva, A., & Finn, S. C. (2012). *Chemistry in Infrared Dark Cloud Clumps: A Molecular Line Survey at 3 mm*. *The Astrophysical Journal*, 756(1), 60–91.

Shu, F. H., Adams, F. C., & Lizano, S. (1987). *Star formation in molecular clouds: Observation and theory*. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 25, 23–81.

Tan, J. C., Beltrán, M. T., Caselli, P., Fontani, F., Fuente, A., Krumholz, M. R., McKee, C. F., & Stolte, A. (2014). *Massive Star*

Formation. In H. Beuther, R. S. Klessen, C. P. Dullemond, & T. Henning (Eds.), *Protostars and Planets VI* (pp. 149–172).

Trinidad, M. A., Curiel, S., Cantó, J., D'Alessio, P., Rodríguez, L. F., Torrelles, J. M., Gómez, J. F., Patel, N., & Ho, P. T. P. (2003). *Observations of Water Masers and Radio Continuum Emission in AFGL 2591*. *The Astrophysical Journal*, 589(1), 386–396.

Trinidad, M. A., Verbena, J. L., de la Fuente, E., & Alcolea, J. (in press). *Chemical Insights into Massive Young Stellar Objects and Ultracompact H II Regions: I. Unveiling Molecular Environment at 85.8–89.8 GHz*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

Urquhart, J. S. (2024). *Evolutionary Trends in Star Formation*. In T. Hirota, H. Imai, K. Menten, & Y. Pihlström (Eds.), *Cosmic Masers: Proper Motion Toward the Next-Generation Large Projects* (Vol. 380, pp. 135–151). IAU Symposium.

van Dishoeck, E. F. (2018). *Astrochemistry: overview and challenges*. In M. Cunningham, T. Millar, & Y. Aikawa (Eds.), *Astrochemistry VII: Through the Cosmos from Galaxies to Planets* (Vol. 332, pp. 3–22). IAU Symposium.