

Recepción: 06.03.2026

Revisión: 31.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0009-0001-6215-705X>

<https://orcid.org/0000-0003-1716-7707>

<https://orcid.org/0000-0002-3795-0304>

<https://orcid.org/0000-0002-5796-0649>

MAGNESIO EN EL ESPACIO CIRCUNESTELAR: UN NUEVO PANORAMA EN LA QUÍMICA CÓSMICA

MAGNESIUM IN CIRCUMSTELLAR SPACE: A NEW PANORAMA IN COSMIC CHEMISTRY

Betsie Carolina Muñoz Sanchez^{1,4},
María Eugenia Castro²,
Francisco J. Melendez^{3*},
Norberto Aquino Aquino⁴

¹Estudiante de Maestría en Ciencias Químicas, Facultad de Ciencias Químicas,

²Centro de Química, Instituto de Ciencias (ICUAP)

³Laboratorio de Química Teórica, Facultad de Ciencias Químicas,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 72570, Puebla, México.

⁴Departamento de Física, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad
Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, 09310, Ciudad de México, México.

Correos:

ms225470405@alm.buap.mx

mareug.castro@correo.buap.mx

naa@xanum.uam.mx

francisco.melendez@correo.buap.mx*

Resumen

La identificación de moléculas en el espacio es clave para comprender la evolución química del Universo y el origen de la materia que compone los planetas y también los sistemas vivos. Esta tarea se sustenta en la espectroscopia astronómica, una disciplina que permite detectar especies químicas a distancias interestelares mediante la interpretación de las huellas dactilares espectrales en la radiación estelar. En este artículo se presenta una revisión conceptual breve e histórica de esta técnica, desde sus fundamentos en la mecánica cuántica hasta su implementación en instrumentos interferométricos milimétricos de alta resolución. Se analiza el caso de la envoltura circunestelar de la estrella gigante roja rica en carbono IRC+10216 (CW Leonis), donde se logró la detección pionera del isocianuro y cianuro de magnesio (MgNC y MgCN). La combinación sinérgica de observaciones interferométricas y predicciones teóricas *ab initio* permitió identificar estas moléculas, desafiando el paradigma tradicional de la naturaleza química de los metales en entornos astrofísicos fríos. Este ejemplo ilustra cómo la espectroscopia astronómica, no solo cataloga la composición molecular del cosmos, sino que también revela los procesos físico-químicos que gobiernan la formación molecular en estrellas evolucionadas.

Palabras clave: Espectroscopia; Interferometría; CW Leonis; MgCN; MgNC; Astroquímica.

Abstract

The identification of molecules in space is essential for understanding the chemical evolution of the Universe and the origin of the matter that composes planets and also the living systems. This task relies on astronomical spectroscopy, a discipline that enables the detection of chemical species at interstellar distances through the interpretation of the unique spectral fingerprints imprinted on starlight. This article presents a brief conceptual and historical review of this technique, from its foundations in quantum mechanics to its implementation in high-resolution millimeter interferometric instruments. The circumstellar envelope of the carbon-rich red giant IRC+10216 (CW Leonis) is analyzed as a case study, where the pioneering detection of magnesium isocyanide and cyanide (MgNC and MgCN) was achieved. The synergistic combination of interferometric observations and *ab initio* theoretical predictions made it possible to identify these molecules, challenging the traditional paradigm regarding the chemical behavior of metals in cold astrophysical environments. This example illustrates how astronomical spectroscopy not only catalogs the molecular composition of the cosmos, but also reveals the physicochemical processes that govern molecular formation in evolved stars.

Keywords: Spectroscopy; Interferometry; CW Leonis; MgCN; MgNC; Astrochemistry.

Introducción

Espectroscopia astronómica

La espectroscopia es la rama de la física que estudia los espectros (Real Academia Española, 2023); a su vez, un espectro está definido como la distribución de la intensidad de una radiación en función de una magnitud característica, como la longitud de onda, la energía o la temperatura (Real Academia Española, 2023). Por lo que, de manera general, se puede considerar la visión humana del color o la percepción auditiva como una forma básica de espectroscopia.

Como se muestra en la Figura 1, los fundamentos de la espectroscopia moderna surgen de la teoría cuántica. Un punto clave fue el modelo atómico de Bohr, que introdujo la idea de niveles de energía cuantizados y estableció que las transiciones entre un estado inicial (E_i) y uno final (E_f) ocurren mediante la absorción o emisión de un fotón de frecuencia ν , de acuerdo con la relación $E_i - E_f = h\nu$, donde h es la constante de Planck (Merkt & Quack, 2011).

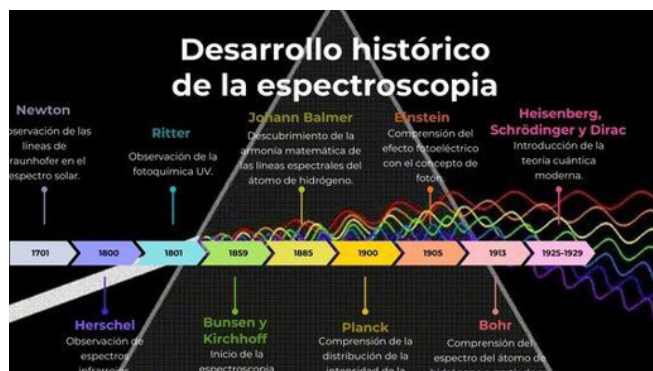


Figura 1. Experimentos espectroscópicos a lo largo de la historia que desarrollaron el marco teórico en el que se basa la espectroscopia molecular de alta resolución actual (Elaboración propia).

Además, en la imagen se observa que este marco teórico se completó posteriormente con la introducción de la teoría cuántica moderna en los trabajos de Heisenberg, Schrödinger y Dirac. En esencia, la espectroscopia molecular de alta resolución actual se basa en el uso de esta teoría mecánico-cuántica para estudiar la estructura y dinámica de átomos y moléculas, así como para numerosas aplicaciones científicas y tecnológicas.

En espectroscopia molecular, los espectros contienen información del estado cuántico de una entidad química, que se describe mediante una función de onda que define la probabilidad de obtener ciertos valores de energía. En estos

casos, la energía no se manifiesta como un único valor, sino como una distribución estadística asociada a dichas probabilidades. En analogía se puede decir que se maneja como un acorde musical, el cual no es una sola nota, sino la mezcla de varias notas que, al ser analizadas, revelan las notas individuales y su intensidad.

Como consecuencia, los espectros observados consisten en patrones de líneas cuya posición e intensidad reflejan las probabilidades de transición entre niveles de energía específicos. Como consecuencia, los espectros observados consisten en patrones de líneas cuya posición e intensidad reflejan las probabilidades de transición entre niveles de energía específicos.

Huellas dactilares de las moléculas

Los espectros, con sus patrones característicos, permiten identificar átomos y moléculas particulares, tanto en el laboratorio como en el espacio, actuando como verdaderas **huellas dactilares espectrales**.

Estas huellas dactilares espectrales se revelan a través de un proceso de medición espectroscópica. En dicha medición en un laboratorio es necesario aplicar un estímulo que se hace llegar a la muestra para medir posteriormente su respuesta, la cual es registrada por un dispositivo de detección. En muchos experimentos espectroscópicos, la muestra consiste en moléculas en equilibrio térmico, y la perturbación externa induce transiciones entre sus niveles de energía, generando una desviación controlada de dicho equilibrio. En general, cuando se buscan observar las propiedades fundamentales de un

sistema, es conveniente perturbarlo lo menos posible durante la medición, de modo que se resalten sus propiedades intrínsecas sin alterar significativamente su comportamiento natural. Sin embargo, en astronomía no se controla el estímulo, sino que únicamente se observa la radiación emitida o absorbida de manera natural por los objetos celestes.

Es por ello que al analizar la luz que llega de una estrella, una de las primeras características observables es su color. A través de la ley de Wien, el color del máximo de emisión permite estimar la temperatura superficial de la estrella. Como se muestra en la Figura 2, las estrellas se clasifican según su temperatura, observándose que aquellas más calientes emiten principalmente en la región azul del espectro, mientras que las más frías lo hacen en la región roja (Costa et al., 2012).

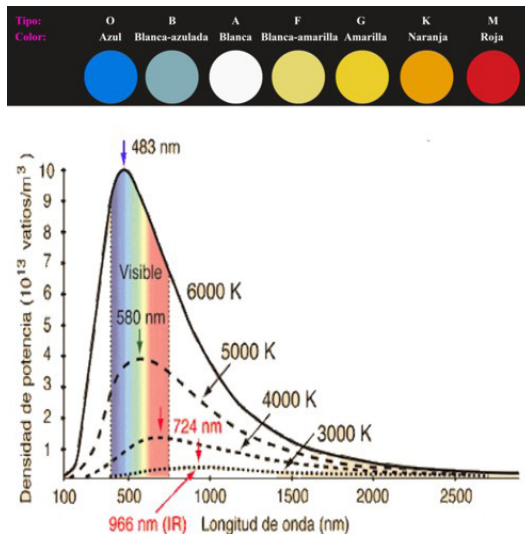


Figura 2: Tipos espectrales de estrellas determinados por la ley de Wien (Elaboración propia).

Por otro lado, la luminosidad de una estrella no depende únicamente de su temperatura, sino también de su tamaño. Por ello, existen estrellas frías muy luminosas, como las gigan-

tes y supergigantes rojas, y estrellas calientes poco luminosas, como las enanas blancas. Esta información es clave para comprender la etapa evolutiva de la estrella.

En la Figura 3 se puede observar que la evolución estelar depende fuertemente de la masa inicial de la estrella. Las estrellas menos masivas, generalmente más frías y de menor luminosidad, evolucionan de manera distinta a las estrellas más masivas, que son más calientes y brillantes.

Durante gran parte de su vida, las estrellas permanecen en equilibrio hidrostático, donde la atracción gravitatoria tiende al colapso, y la presión interna, asociada a la producción de energía en el núcleo, actúa para compensarlo.

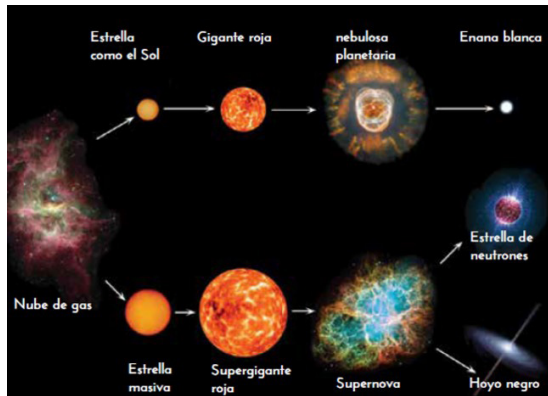


Figura 3: Evolución de las estrellas según su masa (Costa et al., 2012).

Cuando el combustible nuclear comienza a agotarse, este equilibrio se rompe, y la estrella entra en una fase de gigante roja. Estas etapas evolutivas generan entornos ricos en moléculas, como las envolturas circunestelares, las cuales pueden ser estudiadas espectroscópicamente con la instrumentación adecuada desde la Tierra. Con el tiempo, las estrellas expulsan sus capas externas y los cuerpos estelares de baja y mediana masa, como el Sol, terminan su evolución como enanas blancas. Por otro lado, las estrellas muy masivas evolucionan hacia supergigantes rojas y pueden finalizar su vida en una explosión de supernova, dando lugar a una estrella de neutrones o, en los casos más extremos, a un agujero negro.

En el Universo, hay material que está a temperaturas mucho más bajas que la de las estrellas, como las nubes de material interestelar. Estas nubes no emiten radiación visible, pero pueden ser detectadas en longitudes de onda largas, como el infrarrojo, las microondas y las ondas de radio. Observar el Universo en distintas regiones del espectro electromagnético permite obtener una imagen más completa de su

estructura, temperatura y contenido energético, y construir modelos mucho más realistas de su evolución (García et al., 2012).

La mayoría de los cuerpos celestes emiten radiación en múltiples longitudes de onda. Algunas regiones del espectro electromagnético pueden quedar bloqueadas por la presencia de polvo o gas. Por ejemplo, el polvo presente en el centro de nuestra galaxia impide ver la intensa luz visible producida por la concentración de millones de estrellas. Sin embargo, dicho polvo es transparente a la radiación infrarroja, que logra atravesarlo y llegar hasta los instrumentos de observación en la Tierra. Este polvo protege a las especies moleculares de ser destruidas por la radiación ionizante y podría ser de ayuda en la formación de moléculas complejas.

Un claro ejemplo de estas detecciones son el descubrimiento de las huellas dactilares moleculares del agua (H₂O), el metano (CH₄) y moléculas orgánicas complejas en nubes interestelares y atmósferas planetarias, simplemente analizando los patrones de líneas en sus espectros de radio y microondas.

Estrella CW Leonis

La estrella IRC+10216 (también conocida como CW Leonis) es una estrella del tipo gigante roja, rica en carbono (NASA, 2023), la cual se encuentra en las últimas etapas de su evolución estelar, Figura 4. Su importancia para la astronomía radica en su proximidad al Sol y el gran tamaño angular de su envoltura, características que permiten estudios detallados del proceso de pérdida de masa, así como de las últimas etapas de la evolución estelar y de la evolución de la composición del medio interestelar en estas etapas (Knapp, 2002).

Debido a la baja temperatura de CW Leonis se espera que tenga una envoltura circunestelar primordialmente molecular, cuyas abundancias estén determinadas por la química de la fotosfera (capa superficial visible de la estrella) y otros procesos químicos importantes que

tienen lugar a medida que el gas fluye fuera de la estrella, tales como:

- Formación de polvo en unos pocos radios estelares, incorporando una gran fracción de los elementos refractarios, los cuales son elementos químicos con altas temperaturas de condensación que, al enfriarse el gas, se solidifican y forman parte de granos de polvo mineral, como silicatos y óxidos.
- La fotodisociación de muchas moléculas por la radiación UV cuando cruzan el espacio interestelar.
- Formación de moléculas de cadenas complejas mediante reacciones ion-molécula en la envoltura exterior.



Figura 4. CW Leonis, también conocida como IRC+10216, una gigante roja rica en carbono con una compleja envoltura circunestelar (NASA, 2023).

Se puede decir que CW Leonis, y en particular su envoltura circunestelar, la cual es la más brillante y rica en moléculas de todo el cielo, ha sido objeto de intensos estudios, incluyendo diversos estudios de líneas espectrales en longitudes de onda milimétricas y submilimétricas, que revelan el espectro rotacional detallado de las líneas moleculares del objeto.

Hasta 1930 la existencia de moléculas en el medio interestelar era desconocida, se sabía de la existencia de algunos metales como Ca, K, Na, Fe y Ti sólo a nivel atómico. Fue a mediados de esta década cuando aparecieron evidencias de la existencia de algunas moléculas interestelares como CH, CH⁺ y CN (Penzias y Encrenaz 1983).

Hasta la fecha, se han detectado alrededor de 60 especies moleculares y atómicas en la envoltura de la gigante roja CW Leonis (Knapp, 2002), un verdadero zoológico químico interestelar. Entre todos sus habitantes, dos moléculas destacan por su singularidad: el cianuro de

magnesio (MgCN) y el isocianuro de magnesio (MgNC), debido a que su detección constituyó la primera observación en todo el cosmos de moléculas portadoras de magnesio, confirmando a esta estrella como un laboratorio único para la química del Universo.

Detección teórica y experimental de MgNC

La detección del isocianuro de magnesio, MgNC , en el espacio, resumida en la Figura 5, fue posible gracias a la concordancia de predicciones teóricas y experimentos de laboratorio. El proceso se inició en 1986, cuando a

través de las mediciones realizadas en la región milimétrica del espectro con el Interferómetro de Plateau de Bure, se detectaron líneas espectrales de microondas no identificadas en la envoltura circunestelar de la estrella CW Leonis.

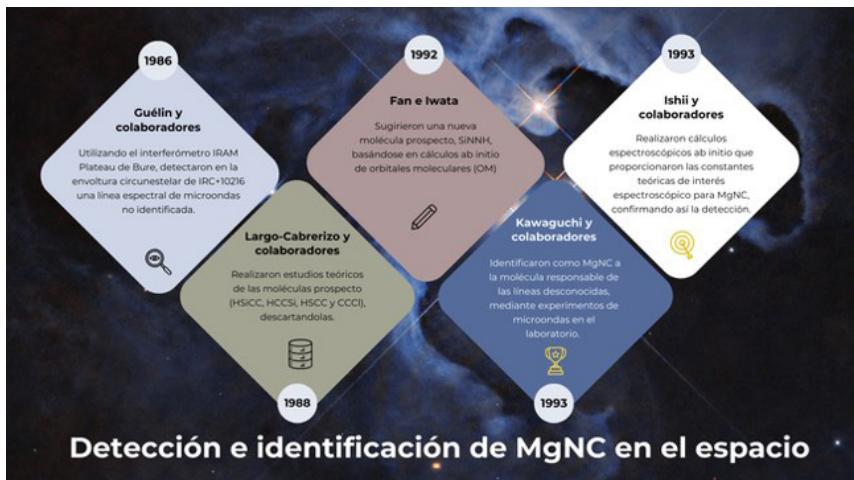


Figura 5: Esfuerzos realizados para que en conjunto se lograra identificar la presencia de MgNC en la envoltura circunestelar de CW Leonis (Elaboración propia).

Dicho interferómetro, como se muestra en la Figura 6, consta de tres antenas móviles de 15 m de diámetro dispuestas a lo largo de una vía férrea en forma de T (Guilloteau et al., 1992). En una medición espectroscópica el interferómetro utiliza las tres antenas para observar el mismo objeto al mismo tiempo de modo que, al combinar la señal recibida por cada antena, simula un telescopio de mayor tamaño y, por lo tanto, obtiene una mejor resolución angular, extrayendo información más precisa del objeto observado con respecto al fondo del universo. Tras la observación inicial de líneas espectrales

misteriosas en la gigante roja CW Leonis, se realizaron diversos cálculos a nivel *ab initio*, de los cuales destacan los realizados por Ishii y colaboradores en 1993, que proporcionaron las 'huellas dactilares' teóricas del MgNC . De forma independiente y casi simultánea, el espectro rotacional de esta molécula fue medido por primera vez en el laboratorio. La coincidencia exacta de las mediciones teóricas y experimentales con las líneas espectrales misteriosas identificadas previamente, confirmó la presencia de MgNC en la gigante roja CW Leonis (Ishii et al., 1993).



Figura 6. Las tres antenas del Interferómetro Plateau de Bure están totalmente orientables y móviles a lo largo de las vías del tren (Guilloteau et al., 1992).

Esta identificación fue notable por varios aspectos (Guélin et al., 1993):

1. Desafió las expectativas de que el magnesio, abundante pero usualmente en forma iónica (Mg^+) e inerte en entornos fríos, no formará moléculas.
2. MgNC se convirtió así en la primera molécula portadora de magnesio jamás observada en el espacio.
3. La forma característica de 'U' de sus líneas espectrales reveló que esta molécula refractaria es particularmente abundante en las regiones más frías y externas de la envoltura circunestelar.

Detección del Isómero MgCN : Un Logro de Predicción Teórica

La identificación del isocianuro de magnesio, MgNC , en 1993 abrió la puerta para buscar su isómero. Los cálculos teóricos, como los de Ishii y colaboradores que habían predicho las propiedades del MgNC , indican la existencia de un isómero estructural casi igualmente estable: el cianuro de magnesio, MgCN , sugiriendo que también podría estar presente en la envoltura de la estrella CW Leonis (Ishii et al., 1994).

A diferencia de MgNC , cuya huella dactilar se pudo medir en el laboratorio, la detección de MgCN dependió decisivamente de las predicciones teóricas de alta precisión en el cálculo de sus frecuencias rotacionales. En 1995, el equipo de Ziurys y colaboradores logró identificar las líneas espectrales del MgCN en el espectro de la envoltura de CW Leonis. Esta identificación fue posible al encontrar en los datos astronómicos un patrón de líneas que coincidía de forma única con las frecuencias rotacionales predichas por los cálculos a nivel *ab initio* para el MgCN (Ziurys et al., 1995). Su hallazgo confirmó la presencia del isómero en el espacio y validó el poder predictivo de la química teórica computacional. Este caso subraya un gran aspecto fascinante de la astroquímica moderna: el gran poder de detección de un gran número de moléculas "solamente usando técnicas basadas en la química teórica" en el espacio.

Estudios posteriores han usado la relación de abundancia observada entre MgNC y MgCN (que favorece al primero, el más estable teóricamente) y los mecanismos de formación propuestos para entender mejor las condiciones físicas y químicas de la envoltura circunestelar. Así, la búsqueda exacta de estas "huellas dactilares" no sólo expandió el inventario molecular cósmico, sino que también validó los modelos teóricos que explican su existencia.

MgCN y MgNC: Claves para Descifrar la Química Cósmica de los Metales

El descubrimiento de MgNC y MgCN en la envoltura circunestelar de la estrella CW Leonis hizo mucho más que ampliar el inventario molecular interestelar: reveló una profunda revisión de la química de los metales en el espacio y abrió una línea de investigación para elucidar cómo pueden y deben formarse moléculas que contienen magnesio, un elemento tradicionalmente considerado refractario e inerte, en las frías regiones del medio circunestelar.

Durante décadas, se asumió que metales como el magnesio se condensan casi por completo en granos de polvo, descartando su participación en la química de fase gaseosa. Sin embargo, la evidencia observacional en CW Leonis demostró que esto no era del todo cierto. La localización espacial de MgNC, predominantemente en las regiones externas y frías de la envoltura en expansión, apunta a un régimen químico dominado no solamente por el equilibrio termodinámico, sino por procesos cinéticos, fotoquímicos y reacciones ion-molécula.

En este entorno tan hostil para el ser humano, especies altamente reactivas pueden formarse y sobrevivir. Experimentos de laboratorio pioneros ya habían mostrado que iones metálicos podían participar eficientemente en procesos de asociación radiativa a bajas temperaturas. En el caso de la gigante roja CW Leonis, los iones Mg^+ , lejos de ser químicamente inertes, probablemente interactúan con radicales abundantes como CN, iniciando rutas de reacción que conducen a la formación de MgNC y MgCN (Petrie, 1996).

De esta manera, la detección de estas moléculas nos abre el panorama a pensar que:

- Una fracción significativa de los metales permanece activa en la fase gaseosa.
- Los metales pueden participar en una química molecular rica bajo condiciones astrofísicas adecuadas.
- La formación molecular en envolturas circunestelares es sin duda un proceso altamente estratificado, donde distintas regiones albergan mecanismos sintéticos diferentes.

Cabe destacar que esta línea de investigación ha continuado con estudios teóricos y experimentales de laboratorio realizados de manera conjunta, que han caracterizado no solo el estado electrónico fundamental de estas moléculas, sino también sus diversos estados electrónicos vibracionalmente excitados (Kagi et al., 1995). Estos trabajos proporcionan información crucial sobre su estabilidad y reactividad química, ayudando a resolver los enigmas sobre el papel específico de estas moléculas en las últimas etapas de la evolución de la estrella CW Leonis.

Así, el camino que comenzó con la observación de líneas espectrales desconocidas culmina en una comprensión más profunda de la química cósmica. Las “huellas dactilares” espectrales de los isómeros MgNC y MgCN no solo identifican nuevas especies moleculares, sino que revelan un universo dinámico, en el que incluso los elementos más refractarios encuentran vías para incorporarse a la compleja danza de la formación molecular. La espectroscopia astronómica, una vez más, no solo nos dice qué existe en el cosmos, sino que nos obliga a replantear cómo funciona su química más íntima.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del escrito, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Descargo de Responsabilidad (Inteligencia Artificial) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Betsie Carolina Muñoz Sánchez agradece a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECITHI) por la beca de maestría con número 913479. Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP) de la BUAP, al Cuerpo Académico BUAP-CA-263 (SEP, PRODEP), al Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México (LNS-BUAP) y al Laboratorio de Supercómputo y Visualización en Paralelo de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I, México) por los recursos computacionales otorgados.

Referencias

- Costa, A., García, B., Moreno, R., & Ros, R. M. (2012). Vida de las estrellas. En R. M. Ros & B. García (Eds.), 14 pasos hacia el Universo: Curso de Astronomía para profesores y posgraduados de ciencias (pp. 104-113). Red para la educación astronómica en la escuela NASE, Unión Astronómica Internacional (UAI).
- García, B., Moreno, R., & Ros, R. M. (2012). Astronomía fuera de lo visible. En R. M. Ros & B. García (Eds.), 14 pasos hacia el Universo: Curso de Astronomía para profesores y posgraduados de ciencias (pp. 114-125). Red para la educación astronómica en la escuela NASE, Unión Astronómica Internacional (UAI).
- Guélin, M., Lucas, R., & Cernicharo, J. (1993). MgNC and the carbon-chain radicals in IRC+10216. *Astronomy and Astrophysics*, 280, L19-L22.
- Guilloteau, S., Delannoy, J., Downes, D., Greve, A., Guélin, M., Lucas, R., Morris, D., Radford, S. J. E., Wink, J., Cernicharo, J., Forveille, T., García-Burillo, S., Neri, R., Blondel, J., Perrigouard, A., Plathner, D., & Torres, M. (1992). The IRAM interferometer on Plateau de Bure. *Astronomy and Astrophysics*, 262, 624-633.
- Ishii, K., Hirano, T., Nagashima, U., Weis, B., & Yamashita, K. (1993). An ab initio prediction of the spectroscopic constants of MgNC: The first Mg-bearing molecule in space. *The Astrophysical Journal*, 410(2), L43-L44.
- Ishii, K., Hirano, T., Nagashima, U., Weis, B., & Yamashita, K. (1994). Ab initio study on low-lying vibrational states and spectroscopic constants of MgNC ($X^2\Sigma$). *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 305, 117-125.
- Kagi, E., Kawaguchi, K., Takano, S., & Hirano, T. (1995). Rotational spectra in the Σ vibrationally excited states of MgNC. *The Journal of Chemical Physics*, 104(4), 1263-1267.
- Knapp, G. R. (2002). CW Leonis, IRC+10216. En C. A. Tout & W. Van Hamme (Eds.), *International Astronomical Union Colloquium* (Vol. 187, pp. 259-271). Cambridge University Press.
- Merkt, F., & Quack, M. (2011). *Molecular Quantum Mechanics and Molecular Spectra, Molecular Symmetry, and Interaction of Matter with Radiation*. En M. Quack & F. Merkt (Eds.), *Handbook of High-resolution Spectroscopy. Fundamentals and Theory* (Vol. 1, pp. 1-55). Wiley.
- National Aeronautics and Space Administration [NASA]. (2023, julio 26). CW Leonis [Imagen]. NASA Science. Recuperado 8 de enero de 2025, de <https://science.nasa.gov/image-detail/cw-leonis/>
- Penzias, A. y Encrenaz P. (1983). Las moléculas del espacio, Capítulo 12 en *ASTROFÍSICA*, Recopilación de artículos de LA RECHERCHE, Ediciones Orbis, Barcelona, España.
- Petrie, S. (1996). On the formation of metal cyanides and related compounds in the circumstellar envelope of IRC +10216. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 282(3), 807-819.
- Real Academia Española. (2023). Espectro. En *Diccionario de la lengua española* (24.ª ed.). Recuperado 7 de enero de 2025, de <https://dle.rae.es/espectro>
- Real Academia Española. (2023). Espectroscopia. En *Diccionario de la lengua española* (24.ª ed.). Recuperado 7 de enero de 2025, de <https://dle.rae.es/espectroscopia>
- Ziurys, L. M., Apponi, A. J., Guélin, M., & Cernicharo, J. (1995). Detection of MgCN in IRC +10216: A new metal-bearing free radical. *The Astrophysical Journal*, 445(1), L47-L50.