

EL GRAN ROMPECABEZAS QUÍMICO DE NUESTRO UNIVERSO: LA NUBE OSCURA TMC-1

THE GREAT CHEMICAL PUZZLE ACROSS THE OUR UNIVERSE: THE DARK CLOUD TMC-1

Rafael Flores Larrañaga¹
María Eugenia Castro²
Gabriel Merino³
Francisco J. Melendez⁴

ISSN 2448-5829

Año 10, No. 28, 2024, pp. 161-170

<https://orcid.org/0000-0003-1084-9748>
<https://orcid.org/0000-0003-1716-7707>
<https://orcid.org/0000-0003-1961-8321>
<https://orcid.org/0000-0002-5796-0649>

Año 10 No. 28

Recibido: 4/noviembre/2023

Aprobado: 30/noviembre/2023

Publicado: 07/enero/2024

- ¹Estudiante de doctorado en Ciencias Químicas, Facultad de Ciencias Químicas, BUAP, 72570, Puebla, México
²Centro de Química del Instituto de Ciencias, ICUAP, BUAP, 72570, Puebla, México
³Departamento de Física Aplicada, CINVESTAV, Unidad Mérida, 97310, Mérida, Yucatán, México
⁴Laboratorio de Química Teórica, Facultad de Ciencias Químicas, BUAP, 72570, Puebla, México
rafael.floresl@alumno.buap.mx*
mareug.castro@correo.buap.mx
gabriel.merino2@gmail.com
francisco.melendez@correo.buap.mx*

Resumen

Una nube molecular es un tipo de nube interestelar caracterizada por tener una densidad alta ($\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$) y temperaturas variables entre 10 a 300 K. En las nubes moleculares los procesos de fotoionización y fotodisociación causados por la radiación UV son ineficientes. En este tipo de nubes los procesos químicos juegan un papel importante en la formación estelar, ocurriendo procesos en fase gas e interacciones entre granos de hielo y gas. La nube molecular de Tauro 1 (TMC-1) es un tipo de nube oscura y es la región formadora de estrellas más cercana al Sistema Solar. Se han detectado numerosas moléculas en TMC-1 con átomos de C, N, O y S, siendo de gran importancia las cadenas de carbono y los cianopolinos. Por ende, comprender las condiciones físicas y químicas en TMC-1 ayudaría a armar el rompecabezas químico acerca de la formación de moléculas grandes en el medio interestelar.

Palabras clave: Astroquímica, nube molecular, cadenas de carbono, cianopolinos, TMC-1.

ABSTRACT

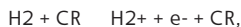
A molecular cloud is a type of interstellar cloud characterized by a high density ($\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$) and variable temperatures that range between 10 and 300 K. In molecular clouds, the photoionization, and photodissociation processes caused by UV radiation are inefficient. In this type of clouds, chemical processes play an important role in star formation, with gas phase processes and interactions between ice grains and gas occurring. The Taurus Molecular Cloud 1 (TMC-1) is a type of dark cloud and is the closest star-forming region to the Solar System. Numerous molecules have been detected in TMC-1 with atoms of C, N, O and S, with carbon chains and cyanopolynes being of great importance. Therefore, understanding the physical and chemical conditions in TMC-1 would help piece together the chemical puzzle about the formation of large molecules in the interstellar medium.

Keywords: Astrochemistry, molecular cloud, carbon chains, cyanopolynes, TMC-1.

¿Qué es una nube molecular?

Una **nube molecular** es un tipo de nube interestelar, con condiciones especialmente importantes para la formación de estrellas. Son nubes esencialmente densas, generalmente con densidades de 104 cm^{-3} (10,000 moléculas por centímetro cúbico) y se encuentran en intervalos de temperatura muy amplios, que varían desde 10 a 300 K (-263.15 a 26.85°C) (Lindon et al., 2017). Su composición química es muy diversa y contiene desde moléculas pequeñas diatómicas hasta moléculas grandes poliatómicas, con más de 7 átomos (Ceccarelli et al., 2018). La materia está en fase gas o en forma de granos de polvo interestelar que pueden estar cubiertos de hielo dependiendo de la temperatura. Si la nube molecular posee zonas capaces de formar estrellas, entonces se denomina **vivero estelar**.

La química que ocurre en las nubes moleculares está íntimamente relacionada con las condiciones físicas, en especial con la radiación (UV y rayos cósmicos). Como una nube molecular es densa, los rayos UV no pueden penetrar con tanta facilidad y la radiación en el centro de una nube molecular es ineficiente para llevar a cabo procesos fotoquímicos a comparación de otras regiones del medio interestelar, en donde la mayoría del hidrógeno, el átomo más abundante del espacio se encuentra en la forma molecular H_2 (Yamamoto, 2014). En cambio, en las nubes moleculares, los rayos cósmicos son responsables de ser la principal fuente de ionización de las moléculas y la especie fundamental es H_3^+ , la cual es precursora de otras moléculas. Su formación está dada por la ionización de H_2 por los rayos cósmicos (CR):



donde mediante una reacción exotérmica (1.73 eV) y sin barrera de energía (Savić et al., 2020) reacciona rápidamente el H_2^+ con H_2 produciendo H_3^+ (Indriolo, 2006) de acuerdo con la siguiente reacción:



Estructura de la nube molecular Tauro 1 (TMC-1)

La **nube molecular Tauro 1 (TMC-1)** es un vivero estelar situado en la constelación de Tauro y Auriga, inmerso en el cúmulo frío galáctico de Planck (Planck Galactic Cold Clumps, PGCCs) llamado Heiles 2 (HCL2). TMC-1 es uno de los 14 cúmulos fríos de los que está compuesto HCL2. Diversos estudios han mostrado que TMC-1 no es un cúmulo con una estructura uniforme (Hirara et al., 1992; Pratap, et al., 1997; Peng et al., 1998), sino que es una estructura filamentosa (Fehér et al., 2016). Está localizada a 140 pc (parsecs) (equivalente a 457 ly, años luz) de nuestro Sol (Elias, 1978; Oishi y Kaifu, 1998), convirtiéndola en la región de formación de estrellas más cercana a nuestro Sistema Solar (von Procházka y Millar, 2021) (Figura 1). Además, se estima que TMC-1 es una nube molecular joven con $\sim 10^6$ años (Suzuki et al., 1992; Hartquist et al., 2001).

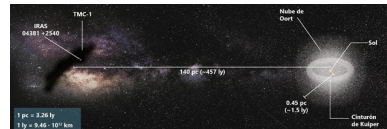


Figura 1. Ilustración esquemática de la distancia de la nube molecular Tauro 1 (TMC-1) respecto a nuestro Sol. Las nubes moleculares aparecen como regiones oscuras en el espacio debido a que la alta densidad de materia absorbe gran parte de la luz.

TMC-1 tiene una densidad de $\sim 6 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$ (Pratap et al., 1997) y una temperatura aproximada de 10 K, donde se pueden encontrar granos de hielo. Su estructura es compleja y tiene un tamaño aproximado de $0.2 \times 0.6 \text{ pc}$ ($\sim 0.65 \times 1.95 \text{ ly}$) (Hirahara et al., 1992). Su

forma es elongada con una cresta an-gosta (Figura 2). La masa total estima-da de TMC-1 es de ~ 30 masas solares (M_{\odot}) (5.96×10^{31} kg) (Schloerb et al., 1983), pero se estima que puede ser aún mayor, pues TMC-1 está compuesta por 4 sub-filamentos (I, II, III y IV) de 20-40 M cada uno (Fehér et al., 2016; Dobashi et al., 2019) y 6 aglomeraciones densas o núcleos (A, B, C, D, E y X) (Hirahara et al., 1992) (Figura 2a). Además, tiene tres regiones caracte-rizadas por la abundancia de especies químicas: la región de cianopolinos (CP) al suroeste, la región de amonia-co (NH_3) al noroeste y la región de monóxido de azufre (SO) cercano al pico NH_3 (Hirahara et al., 1992; Pratap et al., 1997) (Figura 2b). En estas re-giones, la temperatura promedio es de 8.2 – 10 K en la región CP, de 8.6 – 10 K en la región NH_3 y de 9.8 K en la región SO, concordando con la temperatura promedio estimada para TMC-1 de 10 K (Pratap et al., 1997). Asimismo, localizada cerca de la región NH_3 y del núcleo X, se encuentra la protoestrella clase I IRAS 04381 +2540, la cual está relacionada con la evolución temporal y química de los núcleos en TMC-1 (Figura 2a).

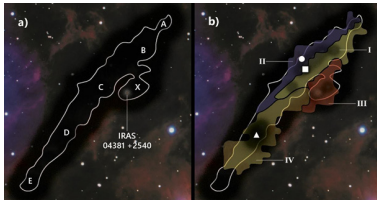


Figura 2. Ilustración esquemática de la nube molecular Tauro 1 (TMC-1). Se muestran: a) los seis núcleos (A, B, C, D, E y X) que componen a TMC-1 y la protoestrella clase I IRAS 04381 +2540 y b) los 4 sub-filamentos de TMC-1 (I, II, III y IV) y las regiones de abundancia de CP (triángulo), NH_3 (cuadrado) y SO (círculo). Imagen modificada de (Hirahara et al., 1992) y (Fehér et al., 2016).

Otras observaciones astronómicas indican que TMC-1 está compuesta por 13 núcleos (Pineda et al., 2010) y 45 aglomeraciones (Peng et al., 1998). De acuerdo a las observaciones realizadas por Peng et al. (1998),

TMC-1 tiene 45 aglomeraciones solo en la región aledeña al núcleo D y parte del núcleo E (Figura 2a), donde sólo 5 de estas aglomeraciones colapsarán por inestabilidad gravitacional. En otras palabras, TMC-1 tiene regiones capaces de formar estrellas, de ahí el nombre de vivero estelar. Sin embargo, la mayoría de los núcleos no formarán estrellas, pero en ellos se llevarán a cabo reacciones químicas importantes tanto en fase gas como en la superfi-cie grano-hielo.

El proceso por el cual TMC-1 puede formar estrellas se explica por la teoría del colapso gravitacional. De acuerdo con esta teoría, los núcleos son regiones donde el polvo interes-telar y el gas se aglomeran debido a la atracción gravitatoria. La densidad de materia en estos núcleos conlleva a una mayor fuerza gravitatoria, y si es lo suficientemente fuerte para que el gas y el polvo colapsen, entonces iniciará la formación estelar (Krumholz et al., 2005) (Figura 3).

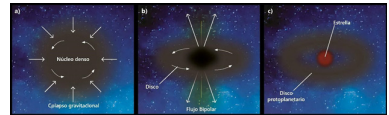


Figura 3. Ilustración esquemática de la formación de una estrella por la teoría del colapso gravitacional de un núcleo denso. a) El núcleo denso comienza a colapsar por la fuerza gravitacional mientras rota lentamente. b) La gravedad provoca un aumento de la velocidad de rotación formando un disco alrededor de un núcleo central, mientras que el flujo bipolar lo estabiliza liberando la acumulación de momento angular y materia. c) Finalmente, se forma un disco proto-planetario alrededor de una estrella.

La protoestrella IRAS 04381 +2540 y su relación con la evolución química de TMC-1

La presencia de moléculas de composi-ción orgánica en la región CP se debe al cambio de abundancias en la con-centración de C/O a lo largo de TMC-1 (Bergin et al., 1996). De acuerdo a los modelos químicos de superficie de los granos de hielo (Charnley 1997), la composición orgánica del manto de hielo en TMC-1 incluye una variedad de

cadena de carbono insaturadas, cuya hidrogenación produce alcoholes. Pero en la región CP no son comunes las especies químicas con oxígeno que se forman en los granos de hielo, siendo las especies químicas orgánicas dominantes: CH_4 , C_2H_2 y C_2H_4 . Lo anterior sugiere una anomalía en la química de la superficie de los granos de hielo en la región CP provocada por las ondas magnetohidrodinámicas (MHD) de Alfvén provenientes del campo magnético de la protoestrella IRAS 04381 +2540 (Markwick et al., 2000). Las ondas de Alfvén colisionan primero en la región NH_3 aumentando la velocidad de las reacciones químicas en la superficie de los granos de hielo influenciando su evolución. En menor medida, estas ondas también interactúan en la región de CP, pero la química en esta región es evolutivamente menos avanzada debido a que las ondas de Alfvén tardan en llegar $\sim 15,000$ años.

Ondas de Alfvén

Las estrellas, como nuestro Sol, producen erupciones violentas llamadas viento solar. Estas erupciones producen variaciones en el gas de iones y de electrones en estado plasma. En la Tierra, este viento solar es el que provoca las auroras boreales en los hemisferios, colisionando con los átomos en las capas superiores de la atmósfera, los cuales ganan energía y emiten fotones. Las ondas de Alfvén durante 40 años se consideraron como posibles responsables de las auroras boreales. Estas ondas son oscilaciones de baja frecuencia que se propagan en dirección de un campo magnético de un plasma a través de un proceso conocido como amortiguamiento de Landau (Landau, 1946) (Figura 4).

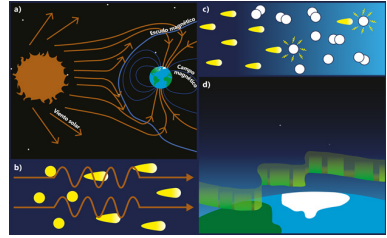


Figura 4. Ilustración esquemática del proceso en que las ondas de Alfvén propician la aparición de las auroras boreales. a) El viento solar, compuesto por hidrógeno ionizado y helio como plasma, interactúa con el campo magnético de la Tierra, por medio del amortiguamiento de Landau, son capaces de transferir su energía a los electrones del plasma, acelerándolos. c) Los electrones acelerados interactúan con el N y O presentes en la atmósfera terrestre, d) como resultado de estas colisiones, los átomos emiten luz roja en las altitudes más altas y luz verde en las más bajas, provocando las auroras boreales en los hemisferios.

El plasma, conocido como cuarto estado de la materia, consiste en materia muy caliente, tan caliente que los electrones son arrancados de los átomos formando un gas ionizado. Así como al hervir un líquido se convierte en gas, al calentar un gas formará un plasma, que consiste en partículas cargadas positivamente (iones) y negativamente (electrones). Los plasmas comprenden alrededor del 99% del Universo visible y están presentes en nebulosas, estrellas e incluso en las auroras boreales (PSFC, 2023). Sin embargo, los plasmas también se pueden crear artificialmente en laboratorios.

Los electrones del plasma absorben la energía de las ondas de Alfvén y los aceleran ocasionando su precipitación en nuestra atmósfera. Recientemente, se ha demostrado que la interacción de las ondas de Alfvén con la materia son las causantes de las auroras boreales (Schroeder et al., 2021).

¿Por qué estudiar la química de TMC-1?

TMC-1 es una de las nubes interestelares más estudiadas, con una química interesante y compleja donde se forman cadenas de carbono grandes (de más de 7 átomos) (Cabezas et al., 2021) y cianopolinos (cadenas de C y N) (Cernicharo, 2021a) (Figura 5), además de haber sido detectadas especies neutras, radicales, aniones, cationes y especies químicas con átomos de C, N, O y S (Müller, 2023).

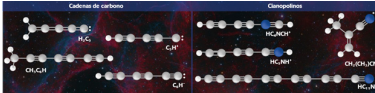


Figura 5. Ejemplos de cadenas de carbono y cianopolinos detectados en TMC-1.

La química en TMC-1 tiene una gran actividad en el manto de hielo que cubre a los granos de polvo, ocurriendo procesos de hidrogenación en los que no se pueden formar especies químicas complejas y en su lugar se producen especies químicas pequeñas que están saturadas por hidrógeno (Peng et al. 1998; Harju et al., 2000) (Figura 6). En la región CP predominan las moléculas como CH_3CCH , C_2H y HC_3N , mientras que en la región NH₃ las moléculas N_2H^+ , H_{13}CN , HN_{13}C , C_3S son las predominantes. Estas abundancias son relativas a la abundancia del HCO^+ , el cual Pratap et al. (1997) empleó como marcador, debido a que se forma por reacciones químicas sencillas que están directamente relacionadas con CO , otra molécula muy abundante en el espacio interestelar (Millar et al., 1997). En términos de evolución química, la región CP está menos evolucionada que la región NH₃, pues la presencia de cadenas de carbono es común en nubes moleculares jóvenes con una edad de ~ 105 años donde el átomo de carbono es abundante (Suzuki et al., 1992).

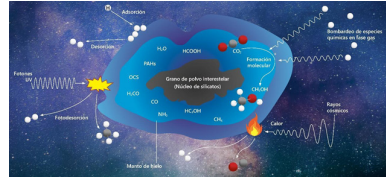


Figura 6. Ilustración esquemática de la química en la superficie de los granos de hielo. En los granos de hielo ocurren procesos de adsorción y desorción de especies en fase gas que se adhieren al manto exterior de hielo del grano, así como bombardeo de otras especies en fase gas que contribuyen a reacciones químicas en la superficie del grano. El manto de hielo que recubre al grano está sujeto a cambios mediados por fotones UV que producen la fotodesorción, además de rayos cósmicos que producen calor liberando especies químicas volátiles.

La diferente evolución de las regiones a lo largo de TMC-1 se debe a que poseen condiciones físicas y químicas particulares. De manera general, la química interestelar no sólo depende de la abundancia de ciertos elementos o moléculas, ni tampoco de la simple colisión de la materia. La química de la nube molecular TMC-1, además de estar influenciada por los rayos cósmicos, los rayos UV y la temperatura, también lo está por otros objetos cercanos a ella, como la protoestrella IRAS 04381 +2540 que acelera las reacciones químicas mediante las ondas de Alfvén.

En TMC-1, además de que se han detectado numerosas moléculas, se espere la existencia de otras como los heterociclos aromáticos policíclicos de nitrógeno (PANHs) y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs). Se ha sugerido, que tanto los PANHs como los PAHs son los responsables de la presencia de las **bandas interestelares difusas (DIBs)** en los espectros medidos por los radioastrónomos. Las DIBs son bandas características en el espectro de absorción de objetos astronómicos de nuestra galaxia y otras galaxias, y su caracterización constituye uno de los principales retos en la astronomía. A pesar de ser un misterio por más de 100 años, su origen aún es incierto, pero se propone que las cadenas de carbono grandes pueden ser las responsables. Por ejemplo, en 2015,

se identificó al buckminsterfullereno (C_{60}^+), una de las moléculas más grandes detectadas en el medio interestelar, como responsable de una de las DIBs (Figura 7).

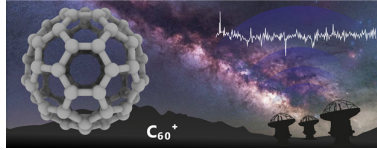


Figura 7. Ilustración del buckminsterfullereno C_{60}^+ , una molécula detectada en el medio interestelar y responsable de las DIB's

Esperemos que con las nuevas investigaciones teóricas y experimentales, y los avances tecnológicos, como el lanzamiento del telescopio espacial James Webb en 2021; o la construcción del telescopio de treinta metros (TMT), el telescopio extremadamente grande (ELT), el telescopio gigante de Magallanes (GMT) o el observatorio Vera C. Rubin (LSST), que entrarán en operación en esta década y poseen una resolución nunca antes vista, el ser humano sea capaz de resolver paulatinamente el misterio de las DIBs. Así como también encontrar más moléculas que vayan llenando el enorme rompecabezas químico de nuestro Universo.

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAH-CYT) por la beca de posgrado con número 794073, a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP) de la BUAP, al Cuerpo Académico BUAP-CA-263 (SEP, PRODEP) y al Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México (LNS-BUAP) por los recursos computacionales otorgados.

REFERENCIAS

- Bergin, E.A., Snell, R.L., Goldsmith, P.F. (1996). Density Structure in Giant Molecular Cloud Cores. *ApJ*, 460, 343.
- Cabezas, C., Tercero, B., Agúndez, M., Marcelino, N., Pardo, J.R., de Vicente, P., Cernicharo, J. (2021). Cumulene Carbenes in TMC-1: Astronomical Discovery of I-H₂C₅. *A&A*, 650, L9.
- Ceccarelli, C., Viti, S., Balucani, N., Taquet, V. (2018). The Evolution of Grain Mantles and Silicate Dust Growth at High Redshift. *MNRAS*, 476, 1371-1383.
- Cernicharo, J., Marcelino, N., Agúndez, M., Bermúdez, C., Cabezas, C., Tercero, B., Pardo, J.R. (2021). Discovery of HC₄NC in TMC-1: A Study of the Isomers of HC₃N, HC₅N, and HC₇N. *A&A*, 642, L8.
- Charnley, S.B. (1997). *Astronomical and Biochemical Origins and Search for Life in the Universe* (1era ed.). Editrice Compositori, Bologna, Italia.
- Dobashi, K., Shimoikura, T., Ochiai, T., Nakamura, F., Kameno, S., Mizuno, I., Taniguchi, K. (2019). Discovery of CCS Velocity-coherent Substructures in the Taurus Molecular Cloud 1. *ApJ*, 879, 88-96.
- Elias, J.H. (1978) A Study of the Taurus Dark Cloud Complex. *ApJ*, 224, 857-872.
- Fehper, O., Tóth, L.V., Ward-Thompson, D., Kirk, J., Kraus, A., Pelkonen, V.M., Pintér, S., Zahorecz, S. (2016). Structure and Stability in TMC-1: Analysis of NH₃ Molecular Line and Herschel Continuum Data. *A&A*, 590, A75.
- Harju, J., Winnberg, A., Wouterloot, J.G.A. (2000). The Distribution of OH in Taurus Molecular Cloud-1. *Astron. Astrophys.*, 353, 1065-1073.
- Hartquis, T.W., Williams, D.A., Viti, S. (2001). Chemical Constrains and Microstructure in TMC-1 Core D. *A&A*, 369, 605-610.
- Indriolo, N. (2006). The Distribution of Cosmic-Ray Ionization Rates in Diffuse Molecular Clouds as Probed by H₃⁺. *Phyl. Trans. R. Soc. A*, 370, 5142-5150.
- Krumholz, M.R., McKee, C.F., Klein, R.I. (2005). The Formation of Stars by Gravitational Collapse rather than Competitive Accretion. *Nature*, 438, 332-334.
- Landau, L. (1946). On the Vibrations of the Electronic Plasma. *J. Phys.*, 10, 25-34.
- Lindon, J., Tranter, G.E., Koopenaal, D. (2017). *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry* (3ra ed.), en: *Interstellar Molecules, Spectroscopy of*. Elsevier Ltd. Academic Press.
- Markwick, A.J., Millar, T.J., Charnley, S.B. (2000). On the Abundance Gradients of Organic Molecules along the TMC-1 Ridge. *ApJ*, 535, 256-265.
- Millar, T.J., Farquhar, P.R.A. Willacy, K. (1996). The UMIST Database for Astrochemistry 1995*. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 121, 139-185.
- Müller, H.S.P. (2023). The Cologne Database for Molecular Spectroscopy: Molecules in Space. CDMS. Recuperado de: <https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules>
- Oishi, M., Kaifu, N. (1998). Chemical and Physical Evolution of Dark Clouds. *Molecular Spectral Line Survey Toward TMC-1. Faraday Discuss.*, 109, 205-216.
- Pratap, P., Dickens, J.E., Snell, R.L., Miralles, M.P., Bergin, E.A., Irvine, W.M., Schloerb, F.P. (1997). A Study of the Physics and Chemistry of TMC-1. *ApJ*, 486, 862-885.

Peng, R., Langer, W.D., Veluzamy, T., Kuiper, B.H., Levin, S. (1998). Low-Mass Clumps in TMC-1: Scaling Laws in the Small-Scale Regime. *ApJ*, 497, 842-849.

Pineda, J.L., Goldsmith, P.F., Chapman, N., Snell, R.L., Li, D., Cambrésy, L., Brunt, C. (2010). The Relation Between Gas and Dust in the Taurus Molecular Cloud. *ApJ*, 721, 686-708.

PSFC. (2023). Plasma Science and Fusion Center Massachusetts Institute of Technology. PSFC. Recuperado de: https://www.psfc.mit.edu/vision/what_is_plasma

Von Procházka, A.A., Millar, T.J. (2021). Species Cycling and the Enhancement of Ammonia in Prestellar Cores. *MNRAS*, 501,1228-1242.

Savić, I., Schlemmer, S., Gerlich, D. (2020). Formation of H₃⁺ in Collisions of H₂⁺ Studied in a Guided Ion Beam Instrument. *ChemPhysChem*, 21, 1429-1435.

Schroeder, J.W.R., Howes, G.G., Kletzing, C.A., Skiff, F., Carter, T.A., Vincena, S., Dorfman, S. (2021). Laboratory Measurements of the Physics of Auroral Electron Acceleration by Alfvén Waves. *Nat. Commun.*, 12, 3103.

Suzuki, H., Yamamoto, S., Ohishi, M., Kaifu, N., Ishikawa, S., Hirahara, Y., Takano, S. (1992). A Survey of CCS, HC₃N, HC₅N, and NH₃ toward Dark Cloud Cores and Their Production Chemistry. *ApJ*, 392, 551.

Yamamoto, S. (2014). Introduction to Astrochemistry: Chemical Evolution from Interstellar Clouds to Star and Planet Formation (1era ed.), en: 3. Basic Concepts for Gas-Phase Chemical Reactions. Springer Nature, Tokio, Japón.

