©Pablo de Vicente, director del Observatorio de Yebes.

Descubriendo nuevas moléculas en el cosmos

El radiotelescopio de Yebes de 40 m

Cerca de la localidad de Yebes, en Guadalajara, se encuentra el radiotelescopio de 40 m del Observatorio de Yebes, adscrito a la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Esta importante infraestructura científica del Mitma ha contribuido en los últimos años al descubrimiento de varias nuevas moléculas nunca antes observadas en el espacio. En este artículo vamos a describir brevemente estos nuevos descubrimientos, realizados en diferentes regiones de nuestra galaxia e incluso fuera de ella.

Texto: Belén Tercero Martínez y Nuria Marcelino Lluch,
Astrónomas del OAN, IGN

El radiotelescopio de 40m de Yebes: una gran antena mirando el cielo desde la Alcarria

El radiotelescopio de 40 m de diámetro vio su primera luz en 2007, y desde el año 2008 ha formado parte de la red europea de interferometría de muy larga línea de base (Very Long Baseline Interferometry, VLBI en sus siglas en inglés), y también de otras redes internacionales de interferometría milimétrica. Pero, además, en los últimos años, está produciendo importantes resultados operando como antena única en observaciones a longitudes de onda centimétricas y milimétricas.

A estas longitudes de onda, lo que vemos es la emisión de las moléculas del gas del Medio Interestelar, en nebulosas donde se van a formar o se están formando nuevas estrellas, en las envolturas de estrellas evolucionadas, y también del medio interestelar de otras galaxias. Esta emisión molecular se puede observar con los radiotelescopios en forma de una serie de líneas espectrales a frecuencias características que son únicas de cada molécula, y por tanto son su seña de identidad. De este modo, podemos estudiar la composición química de dichas regiones y también obtener sus condiciones físicas. Gracias a los radiotelescopios que operan en la región de radio y de microondas, podemos estudiar parte del universo oscuro y frío, cuya emisión nos llega fuera del rango del espectro electromagnético que es visible a nuestros ojos. A pesar de no poder obtener bonitas fotografías, la ciencia no deja de ser menos interesante.

Gracias a la instalación de una nueva instrumentación puntera, llevada a cabo entre los años 2017 y 2019, el radiotelescopio de Yebes de 40 m se ha convertido en uno de los mejores instrumentos para este tipo de observaciones. En particular, la gran sensibilidad de los nuevos receptores y su capacidad de observar simultáneamente un amplio rango de longitudes de onda, le colocan en una situación privilegiada para hacer estudios sistemáticos y profundos del cielo. Esto ha permitido que, desde finales de 2019, se hayan podido descubrir 39 nuevas moléculas nunca observadas antes en el espacio y seis de ellas hayan sido observadas por primera vez fuera de nuestra galaxia.

En este artículo vamos a describir estos nuevos descubrimientos que se han observado en dos regiones de formación estelar, en la envoltura de una estrella gigante roja y en el gas del disco espiral de una galaxia muy lejana. Los resultados descritos han sido publicados en revistas especializadas de prestigio principalmente por dos grupos de investigación liderados por científicos del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y que incluyen a astrónomos del Observatorio Astronómico Nacional (OAN) y del Observatorio de Yebes, ambos dependientes del IGN. Sin embargo, aunque no participen directamente en la obtención de los resultados científicos, estos descubrimientos no hubieran sido posibles sin la colaboración y el trabajo realizado por los ingenieros del Observatorio de Yebes, que han desarrollado esta nueva instrumentación. Estos nuevos descubrimientos ponen a prueba nuestros conocimientos sobre la química del Medio Interestelar y los procesos por los que se forman las moléculas más complejas que pueden dar lugar a la vida en el cosmos.

Una nebulosa oscura que esconde grandes secretos: TMC-1

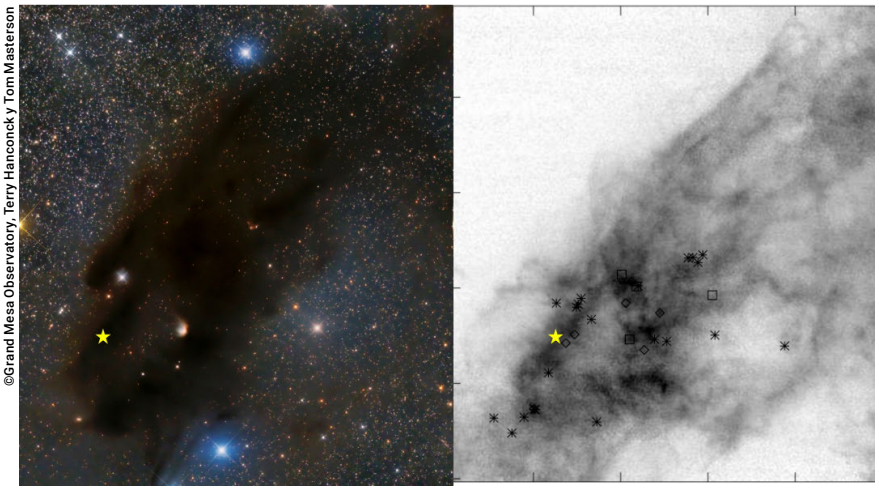
La mayor parte de las nuevas moléculas detectadas por el radiotelescopio de Yebes han sido halladas en una pequeña región oscura de la nube molecular de Tauro: TMC-1, en sus siglas en inglés (Taurus

Molecular Cloud 1). Estas regiones oscurecidas en el cielo, donde no se ven estrellas, fueron bautizadas por sir William Herschel como agujeros en el cielo. En realidad, no son zonas sin estrellas sino nubes de gas molecular que nos impiden ver la luz de las estrellas que hay detrás de ellas. En el interior de estas nubes moleculares gigantes se forman filamentos y núcleos densos, con una densidad media de unas 1 000 moléculas/cm³ (una densidad mucho menor que el mejor vacío que se puede alcanzar en los laboratorios terrestres), y temperaturas muy frías, de hasta -260 ºC (apenas 10 grados por encima del cero absoluto), donde en un futuro se formarán estrellas y quizá un sistema planetario a su alrededor.

El estudio de la química de estas regiones preestelares nos puede dar pistas para entender mejor cómo se forman las moléculas más complejas en las primeras fases de la formación de estrellas y sistemas planetarios, donde, eventualmente, la vida podría abrirse paso. La condensación de TMC-1 es una región relativamente cercana a nosotros, a unos 450 años luz, y ampliamente conocida y estudiada por los radioastrónomos desde los comienzos de la radioastronomía milimétrica en los años setenta del siglo pasado. Desde entonces no ha dejado de mostrar su gran complejidad química, a pesar de ser una nebulosa relativamente simple física y dinámicamente, sin estrellas ni grandes procesos energéticos en su interior.

Debido a su gran riqueza química, TMC-1 se convirtió en un objetivo principal de estudio para el radiotelescopio de Yebes. Ya en 2015, se utilizaron observaciones de este instrumento junto con el radiotelescopio de IRAM 30 m en Granada, para confirmar la detección de una nueva molécula en TMC-1: el ion cianógeno, $NCCNH^+$, cuya emisión nos proporciona información de su contrapartida neutra, NCCN, que no puede ser observada por los radiotelescopios milimétricos.

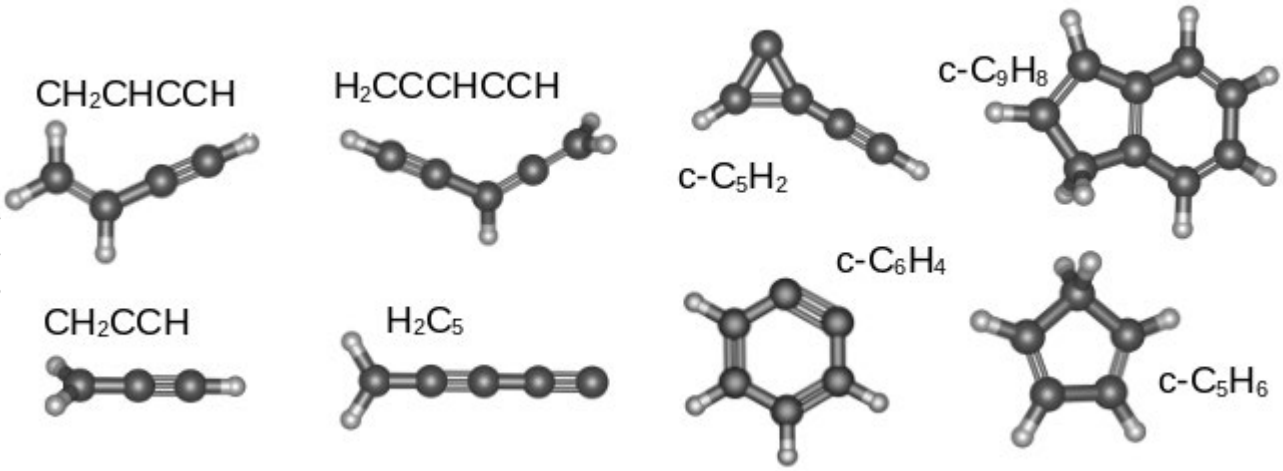
En 2019, el Comité de Programas de Observación de Yebes aprobó un proyecto de observación profunda en TMC-1: el proyecto QUIJOTE (Q-band Ultrasensitive Inspection Journey to the Obscure TMC-1 Environment). Este proyecto utiliza el receptor de banda Q del radiotelescopio de Yebes, a longitudes de



©Grand Mesa Observatory, Terry Hanconck y Tom Masterson

La estrella amarilla indica la posición de TMC-1 dentro de la nube molecular de Tauro, en una imagen en el visible (izquierda), y en la emisión de la molécula de CO a longitudes de onda milimétricas (derecha). Los símbolos en la imagen de la derecha muestran la posición de diferentes protoestrellas y estrellas jóvenes en la región (*Goldsmith et al. 2008, ApJ, 680, 428*).

Algunos de los hidrocarburos, lineales y cíclicos, detectados en TMC-1. Los círculos de mayor tamaño y más oscuros representan átomos de carbono, mientras que los más pequeños son los átomos de hidrógeno.



©José Cernicharo, investigador principal de QUIJOTE

onda alrededor de los 7 mm, donde se pueden encontrar la emisión de moléculas complejas y pesadas. Desde que se recibieron los primeros datos del Proyecto, en julio de 2020, se han detectado 28 nuevas moléculas nunca antes observadas en el espacio. Entre ellas se encuentran varios cationes, moléculas con azufre y muchos hidrocarburos (formados por átomos de hidrógeno y carbono), incluyendo anillos, como el indeno (c-C_9H_8) y la bencina (c-C_6H_4), cuya detección fue una sorpresa al encontrarse en un entorno frío y protegido de la radiación ultravioleta. En particular, el descubrimiento del indeno supone la primera observación directa de un hidrocarburo policíclico aromático (PAH, en sus siglas en inglés) puro, y ha producido un cambio de paradigma en los modelos químicos para poder explicar su formación *in situ* en una nube preestelar.

Se piensa que estos complejos moleculares pueden estar relacionados con la formación de partes del ARN y con el origen de la vida. En la formación de estos hidrocarburos cíclicos pueden jugar un papel importante otros hidrocarburos más simples, como el propargilo (H_2CCCH), que se ha detectado también por primera vez con QUIJOTE y no era tenido en cuenta en los modelos químicos, a pesar de la gran abundancia con la que ha sido observado. En algunos casos la posición de las líneas espectrales de estas nuevas moléculas no se conocía, por lo que era imposible identificar de qué molécula se trataba. Gracias a los datos observados en TMC-1 se han podido obtener las características moleculares que ha de tener la molécula desconocida y así poder descubrir de qué especie se trata. Además, en algunos casos, la colaboración con grupos de laboratorio de espectroscopía molecular ha permitido observar dicha molécula en el laboratorio y contrastar estas medidas con lo observado en el cielo. Este es el caso, por ejemplo, de los iones detectados, de los que no se conocían sus características moleculares. De este modo, nuestra nube molecular se convierte en un laboratorio más.

Los resultados de éstas y otras moléculas observadas por QUIJOTE en el último año y medio han sido publicados en 21 artículos en la prestigiosa revista europea *Astronomy and Astrophysics*, y otros cuatro nuevos artículos están en proceso de edición. Pero esto no termina aquí, ya que quedan unas 1 500 líneas espectrales para las que no se han identificado las moléculas que las producen. Además, QUIJOTE va a continuar su observación profunda de TMC-1 durante los dos próximos años, esperando descubrir otras nuevas especies en su interior.

Este trabajo demuestra que en una nube fría y oscura pueden llegar a formarse moléculas muy complejas como los PAHs, que más adelante, cuando se produzca el colapso gravitacional para la formación de una protoestrella, se incorporarán a los granos de polvo de la nube y acabarán formando parte de futuros planetas como el nuestro.

Moléculas con metales en una estrella moribunda: IRC+10216

En la envoltura que rodea a la estrella IRC+10216, o CW Leonis, se han observado también muchas moléculas con técnicas de radioastronomía milimétrica. Es, como el caso de TMC-1, una vieja conocida de los radioastrónomos desde hace tiempo. Se trata de una estrella, parecida a nuestro Sol, en las últimas fases de su vida, en las que la atmósfera de la estrella se expande en su fase de gigante roja creando una envoltura muy extensa y fría, donde se dan las condiciones para la formación de moléculas. Además, siendo una estrella muy evolucionada, podemos encontrar en estas capas de su atmósfera moléculas con átomos pesados que son el resultado de las reacciones nucleares y otros procesos químicos en el centro de la estrella. También en las envolturas de estas estrellas evolucionadas se forman los gérmenes de los granos de polvo, a partir de la condensación de estas moléculas con metales. Los fuertes vientos estelares de

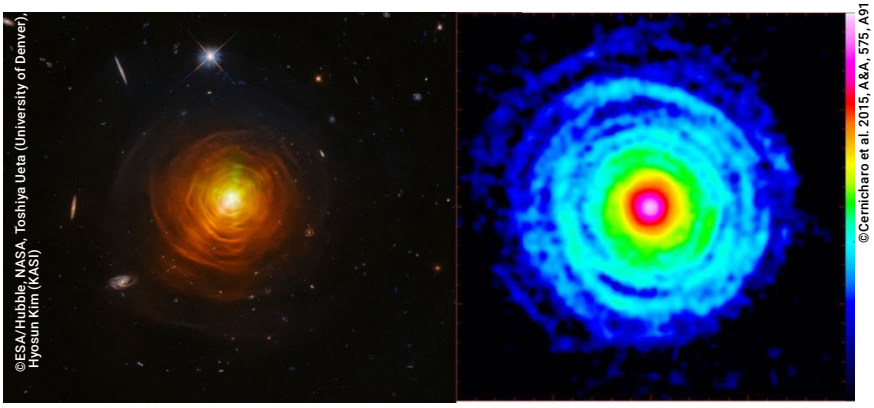
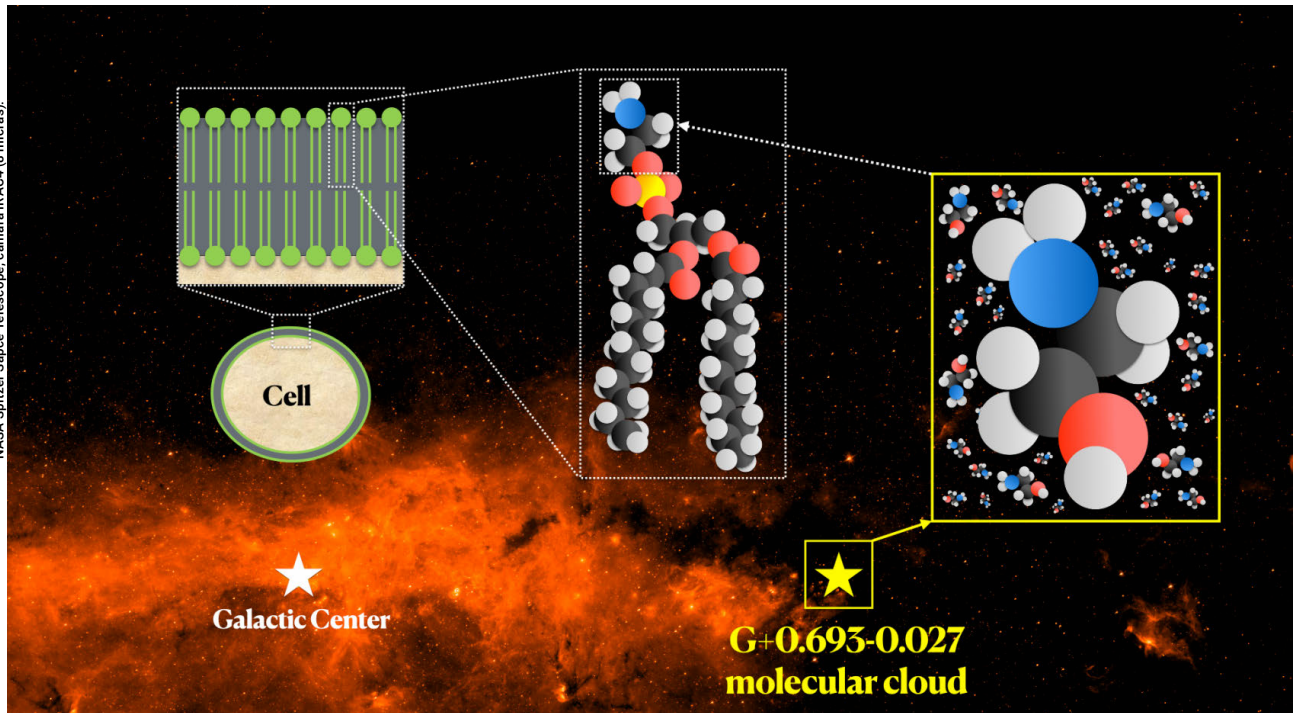


Imagen de la estrella CW Leonis (IRC+10216) en el visible (izquierda) y en emisión de la molécula de CO a longitudes de onda milimétricas (derecha).



©Víctor M. Rivilla, Carlos Briones (Centro de Astrobiología, CSIC-INTA) / NASA Spitzer Sapce Telescope, cámara IRAC4 (8 micras).

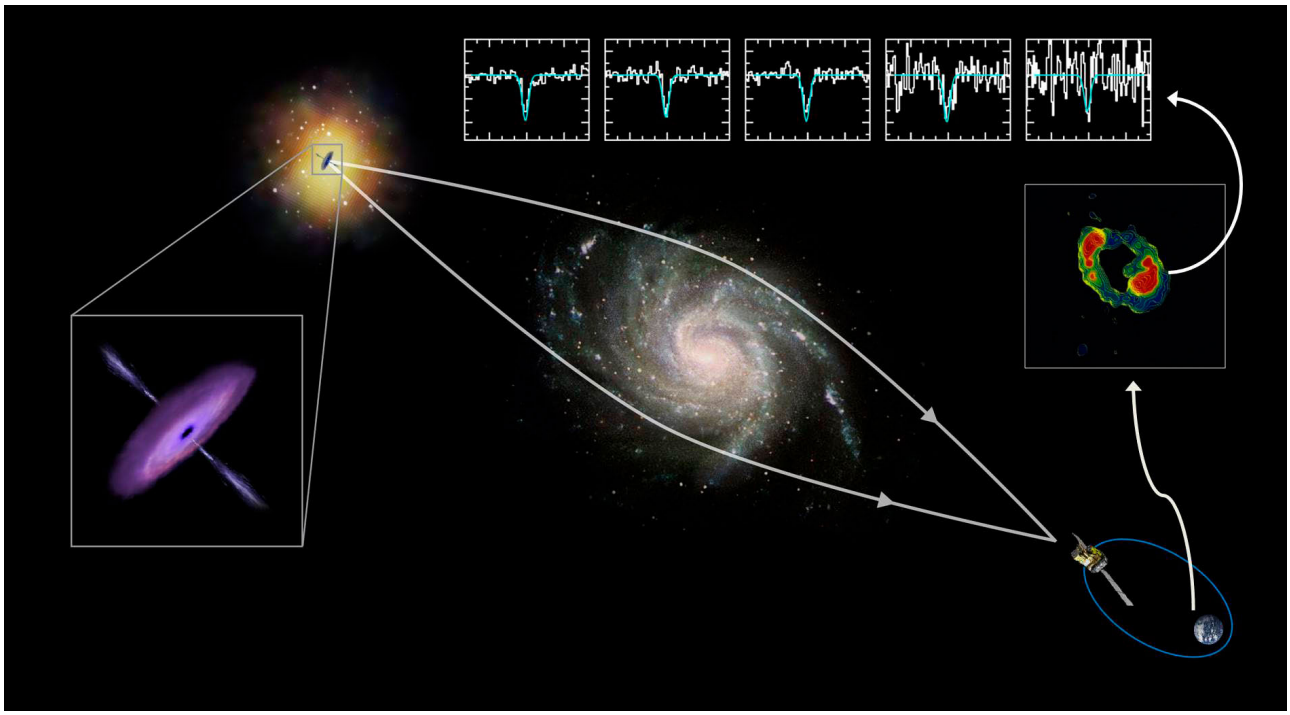
Descubrimiento de la etanolamina ($NH_2CH_2CH_2OH$), la cabeza fosfolípido más simple (constituyente de las membranas celulares) en la nube molecular G+0.693-0.027 localizada en el centro de nuestra galaxia.

estas estrellas moribundas expulsan el gas y el polvo de estas capas exteriores hacia el medio interestelar, desde donde pueden llegar a formar parte de otras nubes moleculares, e incorporarse a una nueva generación de protoestrellas y sistemas planetarios en formación, siguiendo la rueda de la evolución del gas y el polvo en la Galaxia. Aquí la famosa frase de Carl Sagan "somos polvo de estrellas" adquiere todo su significado.

La cercanía de IRC+10216, se encuentra a unos 400 años luz de nosotros, y la gran pérdida de masa que experimenta, hacen de esta estrella una de las más estudiadas a diferentes longitudes de onda, con el objetivo de poder entender su dinámica y obtener su composición química. Utilizando el radiotelescopio de 40 m de Yebes y su receptor de banda Q, se ha observado esta estrella y también se han obtenido importantes resultados, como el descubrimiento de cuatro nuevas moléculas portadoras de magnesio: los radicales MgC_3N, MgC_5N, MgC_4H y MgC_6H. Hasta ahora se habían observado en la envoltura de IRC+10216, moléculas con dos o tres átomos siendo uno de ellos un metal como sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), silicio (Si), hierro (Fe), etc., pero no moléculas con cuatro átomos o más conteniendo metales, como es el caso de las nuevas moléculas observadas. Estas moléculas portadoras de metales suelen formarse principalmente en las capas más internas de la envoltura, cerca de la estrella, pero muchas pueden sobrevivir y llegar a las capas exteriores y así permitir su observación desde radiotelescopios como el 40 m de Yebes. Como en el caso de TMC-1, para poder identificar las moléculas que dan lugar a las líneas espectrales observadas de nuestro objeto, hay que llevar a cabo todo un proceso detectivesco. Solo realizando un análisis detallado de las observaciones y haciendo cálculos precisos de química cuántica, para obtener sus características moleculares, podremos llegar a descubrir la molécula en cuestión. La detección de MgC_3N y MgC_4H se hizo en combinación con datos del radiotelescopio de IRAM de 30 m, aportando líneas espectrales a otras longitudes de onda que ayudaron a confirmar el tipo de molécula. Estas nuevas detecciones y el artículo que presenta todos los resultados obtenidos en las observaciones en banda Q en IRC+10216, se han publicado en la revista especializada *Astronomy and Astrophysics*.

Colisiones de nubes gigantes en el centro de la galaxia: G+0.693-0.027

El centro de nuestra galaxia es una factoría de estrellas a pleno rendimiento. Cerca del agujero negro central, la dinámica de las nubes gigantes de gas y polvo es tremendamente activa, favoreciendo la formación de filamentos y núcleos densos donde se forman estrellas. Parte de estas estructuras se forman a partir de las colisiones entre los grandes complejos de gas y polvo, siguiendo los caprichos



©ESA/ATG medialab; MERLIN; Tercero et al. 2020, A&A, 636, L7

Recreación artística del sistema PKS 1830-211 y el efecto de lente gravitacional junto con la detección de las líneas de HCOOH.

de esta caótica dinámica. Nuestro siguiente objeto, G+0.693-0.027, refleja precisamente la química de dos nubes colisionando cerca del centro galáctico.

Al igual que en la nube de Tauro, en esta región esperamos el colapso de la nube y la subsecuente formación de estrellas. Sin embargo, la química producida por este efecto de choque es completamente diferente a la que encontramos en los núcleos preestelares en colapso autogravitante. Los choques favorecen que el material contenido en los granos de polvo se incorpore a la fase gaseosa, reflejándose en las observaciones los elementos y las moléculas propias de la química de los granos. Cuando este tipo de química es la dominante en una región del cosmos, es común encontrar moléculas sulfuradas y nitrogenadas, algunas de ellas de gran relevancia prebiótica.

Observaciones con el radiotelescopio de Yebes han permitido identificar siete nuevas especies en el espacio en esta región: PO^+, HNCN, HCOSH, C_2H_5NCO, $C_2H_3NH_2$, C_3H_7OH y $NH_2CH_2CH_2OH$. Esta última, la etanolamina, es una molécula de alto interés prebiótico ya que es parte de los fosfolípidos que componen las membranas celulares y, además, puede actuar como precursora del aminoácido glicina. La aparición de membranas celulares representa un hito crucial en el origen y la evolución temprana de la vida en la Tierra, ya que se encargan de mantener unas condiciones estables en el interior de las células, protegiendo tanto el material genético como la maquinaria metabólica.

Estos resultados sugieren que la etanolamina y otras moléculas prebióticas se sintetizan eficientemente en las nubes moleculares donde se forman nuevas estrellas y sistemas planetarios y nos ayudan a comprender los orígenes de las moléculas clave para la aparición de la vida.

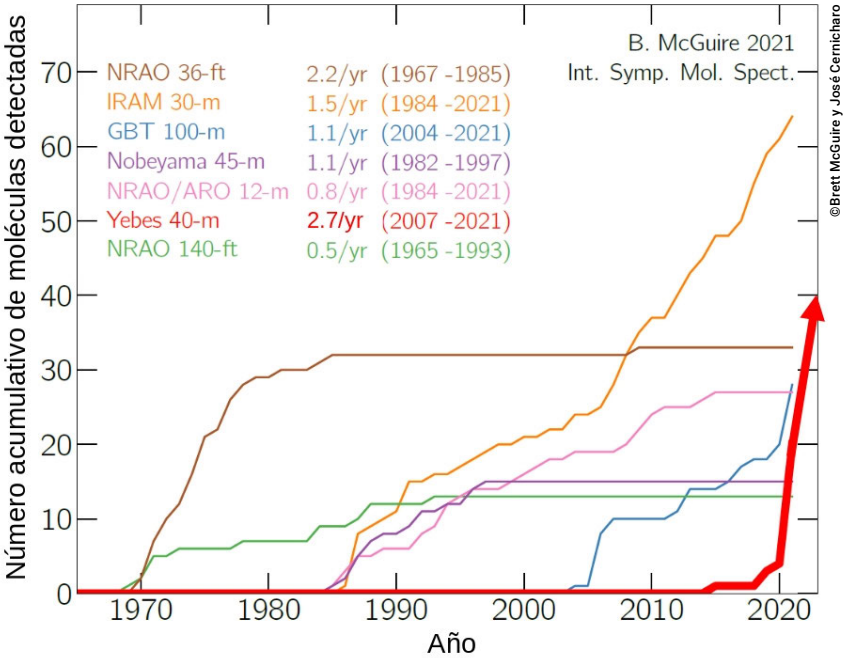
El universo en la mitad de su vida: PKS 1830-211

Terminamos este recorrido viajando fuera de nuestra galaxia, a un objeto lejano también en el tiempo. Se trata del sistema conocido como PKS 1830-211, formado por un cuásar extremadamente brillante y muy lejano, a unos 25 000 millones de años luz (z=2.5), que está perfectamente alineado, en nuestra dirección de mirada, con una galaxia espiral que se encuentra más cercana (z=0.89), a unos 10 000 millones de años luz, cuando el universo tenía algo más de la mitad de su edad actual. La masa de la galaxia más cercana desvía y amplifica la luz del cuásar lejano formando una lente gravitacional, de las predichas por Einstein, según la configuración es-

quematizada en la figura. Cuando observamos astros cada vez más lejanos, los vemos tal y como eran en épocas remotas de la evolución cósmica. Ello es debido a que la luz emitida por esos astros ha necesitado mucho tiempo para llegar ahora a nuestros telescopios. Por tanto, cuando podemos observar el gas de una galaxia lejana, podemos recuperar información muy valiosa sobre los procesos de formación estelar y de la química del medio interestelar en momentos tempranos de la vida del universo.

En este contexto, el radiotelescopio de 40 m de Yebes ha permitido detectar la presencia de nueve moléculas relativamente complejas en la galaxia espiral que intercepta la luz del cuásar. De estas moléculas, seis de ellas han sido detectadas por primera vez fuera de nuestra galaxia: C_3N, C_3H^+, CH_3SH, HCOOH, H_2CN y CH_2CHCN. Estas especies han sido identificadas gracias a la absorción que se produce en la galaxia cercana de la luz procedente de la más lejana y que detectamos a través de líneas espectrales. Gracias a estos resultados podemos asegurar la existencia de estas moléculas en el gas de las galaxias cuando el universo era la mitad de joven (o de viejo).

La identificación de estas especies, además, aporta fascinantes indicios sobre la evolución química del universo, ya que podemos estudiar la composición química del gas en sus momentos más tempranos. En aquella época, solo los elementos formados en estrellas masivas, cuyo tiempo de vida es muy inferior al de las estrellas de tipo solar, han tenido tiempo de ser procesados y devueltos al medio interestelar. Por tanto, la composición del gas que se observa en estas galaxias lejanas debe reflejar, muy selectivamente, los productos de la muerte de estrellas masivas. De este modo, se espera que haya diferencias significativas con la composición del gas en la Vía Láctea, donde los elementos procesados en las estrellas poco masivas ya han tenido tiempo de hacer su contribución.



Evolución del número de nuevas moléculas detectadas por varios radiotelescopios del mundo.

Unos números de récord

En total, 40 nuevas moléculas han sido detectadas con el radiotelescopio de Yebes, desde 2015, lo que supone el 15 % de todas las moléculas detectadas en el cosmos desde los comienzos de la radioastronomía en los años setenta del siglo pasado, y el 9 % de las moléculas observadas en regiones extragalácticas. Es más, de estas 40 nuevas moléculas, ¡37 de ellas han sido descubiertas en los últimos 2 años! Además, gracias a los nuevos datos tan sensibles en la nube de TMC-1 y en la envoltura de la estrella IRC+10216, se ha podido confirmar la presencia de varias moléculas cuya detección era dudosa o estaba respaldada por muy pocas líneas espectrales.

Estos descubrimientos han colocado al radiotelescopio de Yebes a la altura de los grandes telescopios milimétricos y centimétricos más potentes del mundo, como el radiotelescopio de IRAM de 30 m de diámetro (Granada, España) o el Green Bank Telescope de 100 m de diámetro (Virginia oeste, EE.UU.). Como se puede ver en la figura, el salto producido desde 2020 es enorme, teniendo una contribución importante el radiotelescopio de Yebes junto con el GBT.

El radiotelescopio de Yebes de 40 m, en los últimos dos años, no solo nos ha abierto la puerta a los fascinantes descubrimientos que hemos detallado, sino que nos ha brindado unos números de récord. El trabajo coordinado y constante de investigadores de primer nivel con los astrónomos de servicio de la antena y los ingenieros de Yebes nos ha llevado a este gran éxito. ■