

## **exoALMA brinda a la comunidad astronómica nuevos datos sobre los procesos de formación planetaria**

*Además de contribuir a la búsqueda de planetas, el estudio revelará los procesos mecánicos de los discos protoplanetarios*

Un equipo internacional de astrónomos y astrónomas se embarcó en un fascinante proyecto de búsqueda de planetas en formación alrededor de estrellas jóvenes. El proyecto, conocido como exoALMA, usa el poderoso observatorio Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), ubicado en Chile, para estudiar los discos de polvo donde se forman los planetas. Gracias a las nuevas técnicas de obtención de imágenes que se usaron, exoALMA capturó imágenes espectaculares de jóvenes sistemas solares nunca antes observados. El estudio se tradujo en 17 artículos publicados en una edición especial de *The Astrophysical Journal Letters*, y será objeto de nuevas publicaciones en los próximos meses. ALMA es financiado en parte por la Fundación Nacional de Ciencia de Estados Unidos (NSF, en su sigla en inglés) a través del Observatorio Radioastronómico Nacional (NRAO).

"El nuevo método que desarrollamos para recabar estos datos y generar estas imágenes equivalen a cambiar anteojos de lectura por unos poderosos binoculares. De esa forma, revelamos una gran cantidad de detalles de estos sistemas incubadores de planetas —explica Richard Teague, investigador principal del proyecto exoALMA—. Esto nos permitió detectar la presencia de discos increíblemente dinámicos y perturbados, que a su vez constituyen un indicio bastante fehaciente de la existencia de jóvenes planetas que dan forma a los discos donde nacen". El equipo de investigación se centró en 15 sistema estelares jóvenes para estudiar los desplazamientos de gas en detalle, con el fin de revelar los procesos que dan nacimiento a los sistemas planetarios y, en algunos casos, identificar indicios que delataran la presencia de planetas recién nacidos, como surcos y anillos en los discos de polvo que rodean las estrellas, movimientos giratorios en el gas —provocados por la gravedad de un planeta— o cambios en las propiedades físicas de un disco.

A diferencia de los métodos tradicionales de búsqueda de planetas, que consisten en buscar la luz directa emitida por un planeta joven, exoALMA busca detectar los efectos que generan los planetas en su entorno. Este método permite a los astrónomos descubrir planetas mucho más jóvenes. "Es como tratar de encontrar un pez mirando las ondulaciones en el agua de un lago en vez de tratar de ver al pez mismo", señala Christophe Pinte, astrofísico del Instituto de Planetología y de Astrofísica de Grenoble y de la Universidad de Monash, y coinvestigador del equipo exoALMA.

El equipo científico hizo hincapié en las dificultades técnicas para procesar la enorme cantidad de datos que se usaron para generar imágenes tan detalladas. "Desarrollamos técnicas nuevas para alinear con gran precisión las observaciones realizadas en distintos momentos y eliminar distorsiones y ruidos indeseados —cuenta el Dr. Ryan Loomis, del Observatorio Radioastronómico Nacional de Estados Unidos, quien dirigió la publicación sobre el

procesamiento de datos—. Tuvimos que combinar y limpiar cuidadosamente los datos para revelar todos los detalles más sutiles".

Los nuevos métodos de calibración, así como las técnicas de procesamiento y análisis de datos desarrolladas a medida para el proyecto exoALMA, darán a la comunidad astronómica herramientas clave para mapear los procesos de formación planetaria de distintas formas.

- Mayores resolución y sensibilidad: las observaciones aportan una combinación sin precedentes de datos de alta resolución angular (100 mas, o 14 UA a distancias típicas de las fuentes) y alta resolución espectral (26 m/s) de las emisiones de gas de los discos protoplanetarios, lo cual permite detectar ínfimos movimientos y estructuras que revelan procesos clave de formación planetaria.
- Múltiples rastros moleculares: al observar emisiones de  $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$  y CS simultáneamente, se puede estudiar distintas capas verticales y condiciones físicas de un disco.
- Mejores técnicas de obtención y calibración de imágenes: las minuciosas técnicas de alineación, autocalibración y obtención de imágenes desarrolladas permiten generar imágenes de mayor fidelidad con menos interferencia y así detectar características reales de los discos de manera más fiable.
- Desarrollo y validación de métodos numéricos y analíticos: el refinamiento de nuevas técnicas de análisis, junto con procesos exhaustivos de comparación con datos de referencia, garantizan una extracción rigurosa de los datos complementada por simulaciones que proporcionan previsiones sólidas para ponerlas a prueba.

Al aprovechar estas nuevas técnicas y los abundantes datos obtenidos, el equipo de exoALMA logró mapear la densidad, temperatura y estructura de velocidad de los discos protoplanetarios con un nivel de detalles sin precedentes. "Este extenso programa consistió en el estudio sistemático de la estructura tridimensional de muchos de estos discos y aportó datos clave sobre las propiedades físicas del entorno de formación planetaria", afirma Myriam Benisty, científica del Instituto Max Planck de Astronomía de Heidelberg y coinvestigadora de exoALMA. "Otro aspecto emocionante de esta investigación es que la mayor parte del trabajo lo realizaron personas que están empezando su carrera y que escribieron 12 de los 17 artículos que publicamos", comenta Misato Fukagawa, del Observatorio Astronómico Nacional de Japón y coinvestigadora del programa.

Entre los resultados más destacados de esta primera tanda de publicaciones del programa exoALMA, el equipo de investigación logró echar nuevas luces sobre varios aspectos de la formación planetaria:

- El estudio demostró de manera fehaciente que los discos protoplanetarios son entornos sumamente dinámicos, con distribuciones de gas asombrosamente estructuradas, probablemente tanto como las distribuciones de polvo.
- La extracción de perfiles de velocidad de rotación, generalmente con una precisión de 10 m/s, reveló sutiles desviaciones en la rotación kepleriana, un indicio de que las

modulaciones de presión en el disco empujan grandes granos de polvo hacia los anillos observados en todos los discos.

- Al igual que en los estudios de galaxias completas, en los que se usaron curvas de rotación para calcular la masa de halos de materia oscura, en este caso el equipo logró estimar la influencia gravitacional del disco usando un nuevo método para calcular la masa disponible en los planetas en formación, comparándolo con métodos alternativos de referencia basados en flujos de línea.
- exoALMA echa luces por primera vez sobre los principales mecanismos físicos que intervienen durante las primeras etapas de formación de análogos de sistemas solares al revelar las interacciones dinámicas con planetas u objetos compañeros, así como complejas inestabilidades.

"Este análisis conjunto del gas y el polvo está revelando los procesos activos dentro de los discos protoplanetarios que podrían ser responsables de agitar las estructuras que se observan con tanta frecuencia", comenta Stefano Facchini, coinvestigador de exoALMA en la Universidad de Milán.

En el futuro, el proyecto exoALMA promete revolucionar la manera de entender cómo los planetas interactúan con el entorno donde se forman y comprender la existencia de fuentes tan asimétricas, como las que reveló el complejo patrón cinemático bidimensional de estos discos. Los primeros hallazgos de exoALMA están consignados en una serie de artículos publicados en *The Astrophysical Journal Letters*. Todos los datos e imágenes del estudio quedarán a disposición del público para facilitar nuevos hallazgos científicos.

### **Acerca de NRAO**

El Observatorio Radioastronómico Nacional de Estados Unidos (NRAO) es un establecimiento de la Fundación Nacional de Ciencia de Estados Unidos (NSF) operado por Associated Universities Inc. en virtud de un acuerdo de cooperación.

### **Acerca de ALMA**

El Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), una instalación astronómica internacional, es una asociación entre el Observatorio Europeo Austral (ESO), la Fundación Nacional de Ciencia de EE. UU. (NSF) y los Institutos Nacionales de Ciencias Naturales de Japón (NINS) en cooperación con la República de Chile. ALMA es financiado por ESO en representación de sus estados miembro, por la NSF en cooperación con el Consejo Nacional de Investigaciones de Canadá (NRC) y el Consejo de Ciencias y Tecnología de Taiwán (NSTC), y por NINS en cooperación con la Academia Sinica de Taiwán (AS) y el Instituto de Ciencias Astronómicas y Espaciales de Corea del Sur (KASI).

La construcción y las operaciones de ALMA son conducidas por ESO en nombre de sus estados miembro; por el Observatorio Radioastronómico Nacional (NRAO), gestionado por Associated Universities, Inc. (AUI), en representación de Norteamérica; y por el Observatorio Astronómico Nacional de Japón (NAOJ) en nombre de Asia del Este. El Joint ALMA

Observatory (JAO) tiene a su cargo la dirección general y la gestión de la construcción, la puesta en marcha y las operaciones de ALMA.

### **Investigadores principales**

Richard Teague (MIT), Myriam Benisty (MPIA, Universidad de Costa de Marfil), Stefano Facchini (Universidad de Milán), Misato Fukagawa (NAOJ), Christophe Pinte (Universidad de Grenoble Alpes, Universidad de Monash)

### **Colaboradores**

Sean M. Andrews (CfA), Jaehan Bae (Universidad de Florida), Marcelo Barraza-Alfaro (MIT), Gianni Cataldi (NAOJ), Nicolás Cuello (Universidad de Grenoble Alpes), Pietro Curone (Universidad de Milán, Universidad de Chile), Ian Czekala (Universidad de St. Andrews), Daniele Fasano (Universidad de Costa de Marfil, MPIA), Mario Flock (MPIA), Maria Galloway-Sprietsma (Universidad de Florida), Himanshi Garg (Universidad de Monash), Cassandra Hall (Universidad de Georgia), Iain Hammond (Universidad de Monash), Thomas Hilder (Universidad de Monash), Jane Huang (Universidad de Columbia), John D. Ilee (Universidad de Leeds), Andrés F. Izquierdo (Universidad de Florida, Universidad de Leiden, ESO), Kazuhiro Kanagawa (Universidad de Ibaraki), Geoffroy Lesur (Universidad de Grenoble Alpes), Giuseppe Lodato (Universidad de Milán), Cristiano Longarini (Universidad de Cambridge, Universidad de Milán), Ryan A. Loomis (NRAO), Frédéric Masset (Universidad Nacional Autónoma de México), François Ménard (Universidad de Grenoble Alpes), Ryuta Orihara (Universidad de Ibaraki), Daniel J. Price (Universidad de Monash), Giovanni Rosotti (Universidad de Milán), Jochen Stadler (Universidad de Costa de Marfil, MPIA), Leonardo Testi (Universidad de Bolonia, INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri), Hsi-Wei Yen (Instituto de Astronomía y Astrofísica Academia Sinica), Gaylor Wafflard-Fernandez (Universidad de Grenoble Alpes), David J. Wilner (CfA), Andrew J. Winter (Universidad de Costa de Marfil, MPIA), Lisa Wölfer (MIT), Tomohiro C. Yoshida (NAOJ, Universidad de Posgrado en Estudios Avanzados, Sokendai) y Brianna Zawadzki (Universidad Wesleyana, Universidad del Estado de Pensilvania)

### **Financiamiento**

JB recibió financiamiento del fondo n.º 80NSSC23K1312 del programa XRP de la NASA. MB, DF y JS recibieron financiamiento del Consejo Europeo de Investigación (CEI) en el marco del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea (PROTOPLANETS, fondo n.º 101002188). JS realizó sus cálculos en la máquina Mesocentre SIGAMM, del Observatorio de Costa Azul. PC y LT recibieron apoyo del Ministerio de Educación, Universidades e Investigación de Italia a través del fondo Progetti Premiali 2012 – iALMA (CUP C52I13000140001), así como fondos del proyecto ANID BASAL FB210003. NC recibió financiamiento del Consejo Europeo de Investigación (CEI) en el marco del programa de investigación e innovación Horizonte Europa de la Unión Europea (fondo n.º 101042275, proyecto Stellar-MADE). SF recibe financiamiento de la Unión Europea (ERC, UNVEIL,

101076613) y contribuciones financieras de PRIN-MUR 2022YP5ACE. MF recibe apoyo de un fondo de la Sociedad Japonesa para el Fomento de la Ciencia (KAKENHI: No. JP22H01274). CH recibió apoyo del fondo AAG n.º 2407679 de la NSF. IH, CH y TH reciben financiamiento de una beca del Programa de Capacitación en Investigación del Gobierno de Australia. JDI recibió financiamiento de una beca STFC Ernest Rutherford (ST/W004119/1) y de una beca académica de la Universidad de Leeds. AFI recibió financiamiento de la NASA a través del fondo n.º HST-HF2-51532.001-A de la beca NASA Hubble adjudicada por el Space Telescope Science Institute, operado por la asociación de Universidades para la Investigación en Astronomía, Inc., para la NASA en virtud del contrato NAS5-26555. GL recibió financiamiento del fondo Marie Skłodowska-Curie n.º 823823 (DUSTBUSTERS) del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea. CL recibió financiamiento del fondo Marie Skłodowska-Curie n.º 823823 (DUSTBUSTERS) del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea, así como del fondo consolidado ST/W000997/1 del Consejo de Instalaciones Científicas y Tecnológicas (STFC) del Reino Unido. CP recibió financiamiento del Consejo Australiano de Investigación a través de los fondos FT170100040, DP18010423, DP220103767 y DP240103290. DP recibió financiamiento del Consejo Australiano de Investigación a través de los fondos DP18010423, DP220103767 y DP240103290. GR recibió financiamiento del fondo n.º 2022-1217 de la Fundación Cariplo y del fondo n.º 101039651 (DiscEvol) del Consejo Europeo de Investigación (CEI) en el marco del programa de investigación e innovación Horizonte Europa de la Unión Europea. H-WY recibió financiamiento del fondo NSTC 113-2112-M-001-035 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (NSTC) de Taiwán y del Fondo de Desarrollo Profesional de Academia Sinica (AS-CDA-111-M03). GWF recibió financiamiento del fondo 815559 (MHDiscs) del Consejo Europeo de Investigación (CEI) en el marco del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea. GWF obtuvo acceso a recursos HPC de IDRIS en el marco de la asignación A0120402231 de GENCI. TCY recibió financiamiento del fondo JSPS Fellows n.º JP23KJ1008. BZ contó con el apoyo de la fundación Brinson. El presente trabajo también contó con el apoyo del fondo 325594231 FOR 2634/2 TE 1024/2-1 de la Fundación Alemana de Investigación (DFG) y del Cluster of Excellence Origins de la DFG ([www.origins-cluster.de](http://www.origins-cluster.de)). Este proyecto recibió financiamiento del fondo ERC Synergy Grant ECOGAL (n.º 855130) otorgado por el consejo Europeo de Investigación (CEI). Las opiniones vertidas por los científicos financiados por el CEI son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no reflejan necesariamente la visión de la Unión Europea ni del Consejo Europeo de Investigación. Ni la Unión Europea ni ninguna autoridad que haya otorgado financiamiento se hace responsable de dichas opiniones.