

IAA

76

JULIO DE 2025
revista.iaa.es

Información y actualidad astronómica

Revista de divulgación del Instituto de Astrofísica de Andalucía

Observar y simular el universo

50 IAA

INSTITUTO DE
ASTROFÍSICA DE
ANDALUCÍA



EXCELENCIA
SEVERO
OCHOA



CSIC

Instantánea de la simulación Uchuu que muestra la distribución a gran escala de la materia del universo. Crédito: Ishiyama et al. (2021)

Comité de redacción: Emilio J. García, Celia Navas, Amanda López, Sebastiano de Franciscis, Sara Cazzoli, Gabriella Gilli, Rainer Schödel y Roberto Varas. **Diseño:** Silbia López de Lacalle y Celia Navas. **Edición y maquetación:** Celia Navas. **Contacto:** ucc@iaa.es

Este número ha contado con el apoyo económico de la Agencia Estatal de Investigación (Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades) a través de la acreditación de Centro de Excelencia Severo Ochoa para el Instituto de Astrofísica de Andalucía (SEV-2017-0709).

La página web de esta revista ha sido financiada por la Sociedad Española de Astronomía (SEA).

Copyright: © 2018 CSIC. Esta es una revista de acceso abierto distribuida bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Instituto de Astrofísica de Andalucía, Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Excelencia Severo Ochoa

NIPO: 155-24-017-5
e-NIPO: 155-24-018-0
Depósito legal: GR-605/2000
ISSN: 1576-5598

SUMARIO

Observar y simular el universo: el papel de DESI en el estudio de la energía oscura ...	3
La Función Inicial de Masa. Una pieza clave para entender la formación estelar ...	8
Entrevista a Ignasi Ribas ...	10
El Moby Dick de ... Beatriz Aparicio (IAA-CSIC) ...	14
Actualidad ...	16
Historias - Zeitgeist, motor de coincidencias, ¿freno de la creatividad plena? ...	24
P&I - ¿A qué ritmo se expande el universo? El gran conflicto de la cosmología moderna ...	26
Jóvenes miradas - De nada ...	28
Destacados ...	30
Hasta siempre, Ángel ...	31

La misión Solar Orbiter captura las primeras imágenes de los polos del Sol

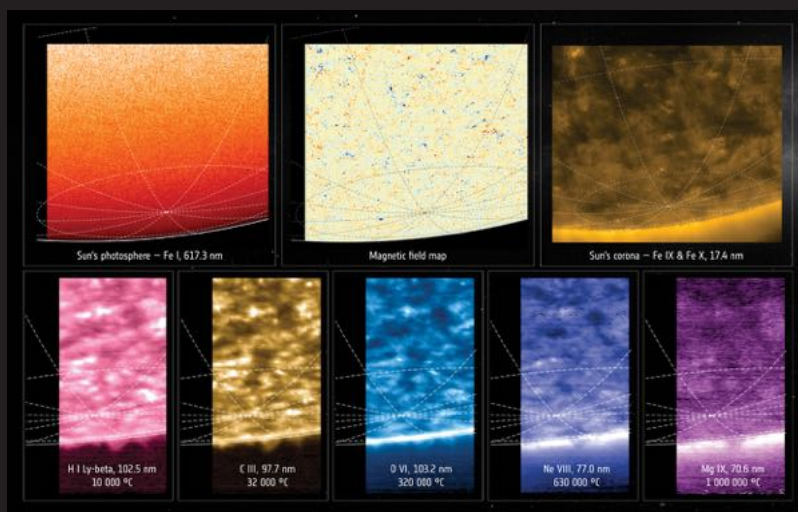
La misión Solar Orbiter, desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA), ha logrado captar las primeras imágenes del polo sur del Sol, marcando un hito en la exploración solar. Hasta ahora, todas las imágenes que conocíamos de nuestra estrella se habían tomado desde el plano de la eclíptica, es decir, desde una perspectiva alineada con la órbita de la Tierra alrededor de nuestra estrella. Ahora, gracias a esta misión, el Sol ha sido observado por primera vez desde una posición fuera de ese plano.

El Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) colidera el mayor de los diez instrumentos científicos a bordo de Solar Orbiter: SO/PHI (*Polarimetric and Helioseismic Imager*). Este instrumento, diseñado para obtener imágenes polarimétricas y realizar estudios heliosísmicos, permite cartografiar con gran precisión el campo magnético solar, el motor de la actividad de nuestra estrella. Gracias a SO/PHI, es posible estudiar en detalle fenómenos como las manchas solares, las tormentas o el viento solar, todos ellos vinculados a la compleja dinámica magnética del Sol.

Las imágenes fueron tomadas los días 16 y 17 de marzo, cuando la nave orbitaba el Sol desde una inclinación de 15 grados por debajo del ecuador solar, apenas unos días antes de alcanzar su inclinación máxima actual de 17 grados. En esta posición privilegiada, tres de los instrumentos a bordo —entre ellos SO/PHI— lograron observar por primera vez el polo sur del Sol con un nivel de detalle sin precedentes.

Mientras SO/PHI capta imágenes del Sol en luz visible y cartografía el campo magnético de su superficie, los otros dos instrumentos, EUI y SPICE, aportan información complementaria sobre la atmósfera solar en distintas longitudes de onda, lo que permite estudiar la corona, la capa más externa del Sol, que alcanza temperaturas de hasta varios millones de grados Celsius, mucho más elevadas que las de su superficie.

En los próximos años, Solar Orbiter continuará aumentando la inclinación de su órbita aprovechando la gravedad de Venus: al pasar cerca del planeta, utiliza su atracción gravitatoria como una especie de “tirón” o impulso que modifica su trayectoria. Gracias a estas maniobras —conocidas como asistencias gravitatorias—, la misión podrá mirar el Sol desde ángulos cada vez más altos y obtener imágenes cada vez más detalladas de sus regiones polares, que hasta ahora han sido prácticamente invisibles para nosotros.



Imágenes del polo sur del Sol en diferentes longitudes de onda. El instrumento SO/PHI capta imágenes del Sol en luz visible (arriba a la izquierda) y cartografía el campo magnético de su superficie (arriba en el centro). Créditos: ESA & NASA/Solar Orbiter/PHI, EUI and SPICE Teams

Observar y simular el universo: el papel de DESI en el estudio de la energía oscura

CUANDO MIRAMOS AL CIELO ESTRELLADO, SOLEMOS IMAGINAR QUE LAS GALAXIAS ESTÁN REPARTIDAS DE FORMA MÁS O MENOS UNIFORME POR EL ESPACIO. PERO NADA MÁS LEJOS DE LA REALIDAD.

Por Elena Fernández García (IAA-CSIC)

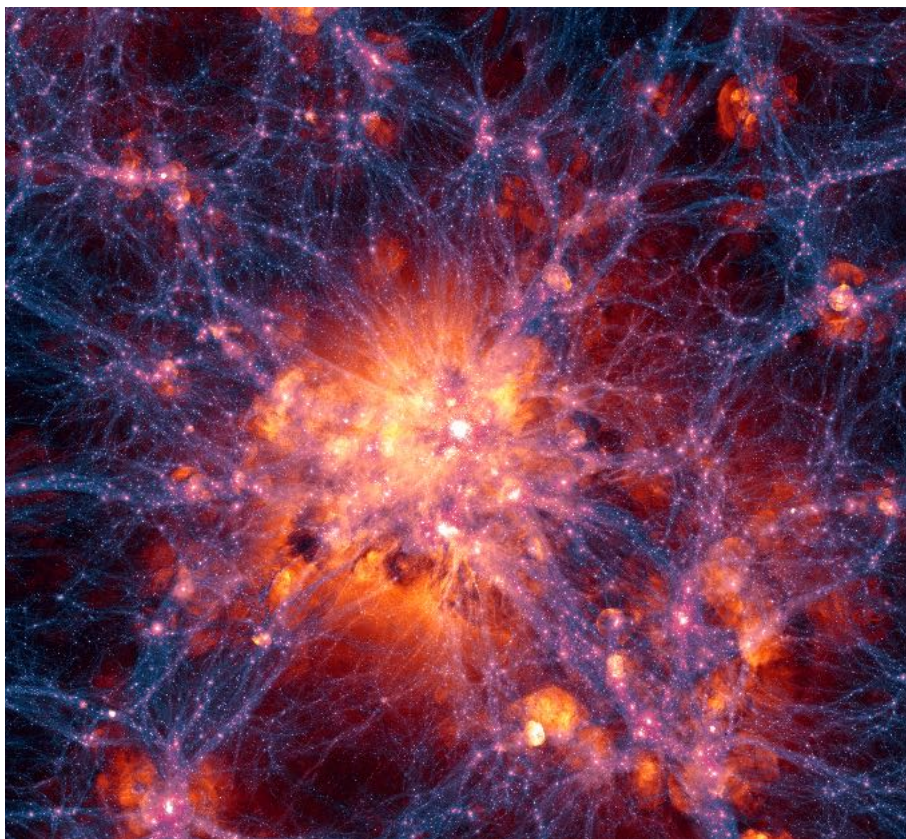
Si pudiéramos alejarnos lo suficiente como para ver el universo en su conjunto, descubriríamos que las galaxias se agrupan formando una inmensa red tridimensional de filamentos, cúmulos y vacíos. A esta gigantesca red se le conoce como la estructura a gran escala del universo y es una de las maravillas más impresionantes de la cosmología moderna.

LA RED CÓSMICA: CÓMO SURGIÓ LA ESTRUCTURA A GRAN ESCALA

La historia de la estructura a gran escala comienza en los primeros instantes después del Big Bang. En esos momentos, el universo era extraordinariamente simple: una sopa caliente y densa de partículas elementales, tan uniforme que cualquier región parecía idéntica a cualquier otra. Pero en esa aparente uniformidad perfecta se escondían las semillas de toda la complejidad que vendría después.

El primer indicio de estas semillas lo encontramos en una de las observaciones más importantes de la cosmología moderna: el fondo cósmico de microondas. Esta radiación es la primera luz que pudo viajar libremente por el espacio cuando el universo tenía apenas 380.000 años de edad. En esa época, la temperatura había bajado lo suficiente como para que los electrones se combinaran con los núcleos atómicos, haciendo el universo transparente por primera vez.

Cuando los científicos cartografiaron esta radiación, con satélites como COBE, WMAP y Planck, descubrieron algo extraordinario. Aunque a primera vista el fondo cósmico de microondas parecía perfectamente uniforme, un análisis más detallado reveló minúsculas variaciones de temperatura, del orden de unas pocas millonésimas de grado. Estas fluctuaciones, aparentemen-



Instantánea de la simulación Illustris, centrada en un cúmulo masivo. Muestra la densidad de la materia oscura superpuesta al campo de velocidad del gas. Crédito: Illustris Collaboration

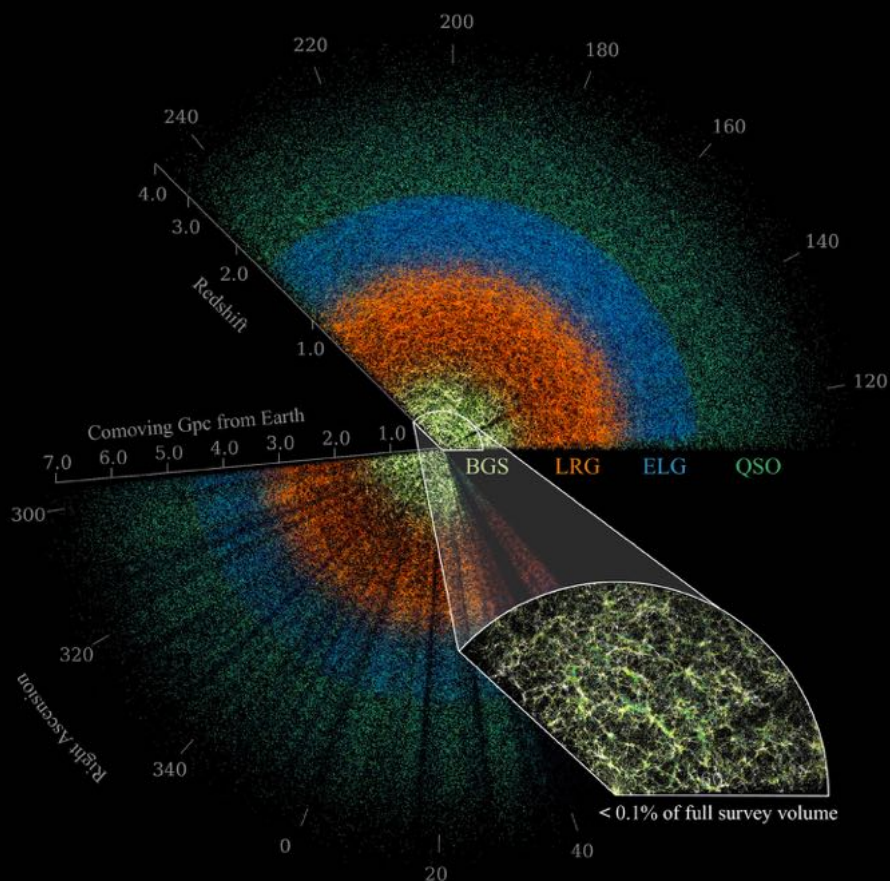
te insignificantes, eran en realidad la huella digital de las primeras irregularidades en la distribución de la materia.

La historia de la estructura a gran escala comienza en los primeros instantes después del Big Bang

Las regiones ligeramente más calientes correspondían a zonas con un poco más de materia de lo normal, mientras que las regiones más frías marcaban lugares donde había un poco menos. Estas diferencias

eran tan pequeñas que representaban variaciones de densidad de apenas una parte en cien mil. Pero fueron suficientes para cambiar el destino del universo.

A partir de ese momento entró en juego la fuerza de la gravedad. Las regiones con algo más de materia ejercían un poco más de atracción gravitatoria, lo que hacía que más materia cayera hacia ellas. Este proceso se retroalimentaba: cuanto más materia se acumulaba, más fuerte se volvía la atracción, y más materia adicional llegaba. Mientras tanto, las regiones que habían empezado con menos materia se fueron vaciando progresivamente y haciéndose cada vez menos densas.



En esta imagen cada punto representa la distancia desde la tierra (centro) a las galaxias observadas con DESI. Entre los objetos se encuentran galaxias cercanas brillantes (en amarillo), galaxias rojas luminosas (en naranja), galaxias con líneas de emisión (en azul), y cuásares (en verde). La estructura a gran escala del universo es visible en la imagen del recuadro, que muestra la región de estudio más densa y que representa menos del 0,1% del volumen total observado durante los primeros tres años. DESI se encuentra instalado en el Telescopio Nicholas U. Mayall de 4 metros del Observatorio Nacional Kitt Peak. Créditos: DESI Collaboration/DOE/KPNO/NOIRLab/NSF/AURA/C. Lamman

Este proceso, conocido como inestabilidad gravitacional, actuó durante miles de millones de años. Las variaciones casi imperceptibles del comienzo se convirtieron en diferencias dramáticas. Las zonas más densas formaron las primeras estrellas, luego las primeras galaxias, después grupos de galaxias, y finalmente los enormes cúmulos y supercúmulos que vemos hoy. Las regiones menos densas se convirtieron en los vacíos cósmicos, enormes burbujas de espacio casi vacío que pueden tener cientos de millones de años luz de diámetro.

DESI: CARTOGRAFIANDO EL UNIVERSO A GRANDES ESCALAS

En el desierto de Arizona, en la cima de la montaña Kitt Peak, se alza una de las máquinas más ambiciosas jamás construidas para estudiar el cosmos. El *Dark Energy Spectroscopic Instrument*, conocido simplemente como DESI, representa un salto inmenso en nuestra capacidad para cartografiar el universo.

DESI no es simplemente un telescopio más grande o más sensible. Es una máquina de precisión diseñada específicamente para abordar uno de los mayores misterios de la cosmología moderna: la naturaleza de la energía oscura. Esta misteriosa fuerza, que constituye aproximadamente el 70% de todo lo que existe en el universo, parece estar acelerando la expansión cósmica, pero no tenemos ni idea de qué es realmente.

Para enfrentarse a este problema, DESI necesita medir las posiciones y distancias de decenas de millones de galaxias con una precisión sin precedentes. Y aquí es donde la ingeniería se vuelve verdaderamente impresionante: el corazón de DESI es un sistema de 5.000 pequeños robots que pueden moverse independientemente para apuntar fibras ópticas hacia galaxias específicas en el cielo y obtener sus espectros.

Cada espectro contiene información crucial sobre la galaxia que lo emitió. La clave está en el desplazamiento al rojo: debido a la expansión del universo, la luz de las ga-

DESI es una máquina de precisión diseñada específicamente para abordar uno de los mayores misterios de la cosmología moderna: la naturaleza de la energía oscura

laxias distantes se estira hacia longitudes de onda más rojas. Cuanto más lejos está una galaxia, mayor es su desplazamiento al rojo. Al medir este desplazamiento con precisión, DESI puede determinar no sólo dónde está cada galaxia en el cielo, sino también a qué distancia se encuentra, construyendo así un mapa tridimensional del cosmos.

¿Y para qué queremos saber esto con tanto detalle? Porque, al reconstruir el mapa tridimensional del universo con tanta precisión, podemos estudiar con mucha más claridad cómo se agrupan las galaxias, qué formas adoptan los filamentos y vacíos, y cómo ha ido cambiando esa estructura a lo largo del tiempo. DESI está diseñado para observar galaxias a diferentes distancias, lo que equivale a mirar el universo en distintas épocas de su evolución. Es, en cierto modo, una máquina del tiempo cósmica.

El proyecto DESI es verdaderamente internacional, con participación de instituciones de todo el mundo, pero España juega un papel particularmente importante en esta historia. El Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) ha sido clave en el desarrollo de la tecnología que hace posible DESI. Después de más de una década de investigación y desarrollo, el equipo del IAA contribuyó al diseño y desarrollo de los posicionadores robóticos de fibra óptica que son el corazón del instrumento.

El corazón de DESI es un sistema de 5.000 pequeños robots que pueden moverse independientemente para apuntar fibras ópticas hacia galaxias específicas en el cielo y obtener sus espectros

Estos pequeños robots, que parecen simples a primera vista, representan un triunfo de la ingeniería de precisión. Cada uno debe ser capaz de moverse a su posición

con una precisión de pocas micras, mantener esa posición estable durante largos períodos de observación, y hacerlo de manera fiable noche tras noche durante años. El desarrollo de esta tecnología requirió innovaciones en mecánica de precisión, control robótico y sistemas de calibración, todo desarrollado en colaboración entre el IAA, empresas españolas y socios internacionales.

Cuando DESI complete su misión de cinco años, habrá observado más de 40 millones de objetos cósmicos

Desde que comenzó sus operaciones científicas en mayo de 2021, DESI ha superado todas las expectativas. En sus tres primeros años de funcionamiento ha cartografiado más de 30 millones de galaxias y cúasares, creando el mapa tridimensional más grande y detallado del universo jamás realizado. Pero esto es solo el comienzo. Cuando DESI complete su misión de cinco años, habrá observado más de 40 millones de objetos cósmicos, creando un legado de datos que mantendrá ocupados a los cosmólogos durante décadas.

DESI ya ha hecho públicos sus primeros catálogos de galaxias de un año completo de medidas y ha mostrado su potencial para revolucionar nuestra comprensión del universo. En los próximos años, se espera que sus datos se conviertan en una referencia esencial para todos los estudios cosmológicos, ayudando no solo a confirmar teorías actuales, sino, tal vez, también a descubrir desviaciones que nos obliguen a replantearnos algunas ideas fundamentales.

SIMULANDO EL UNIVERSO CON UCHUU

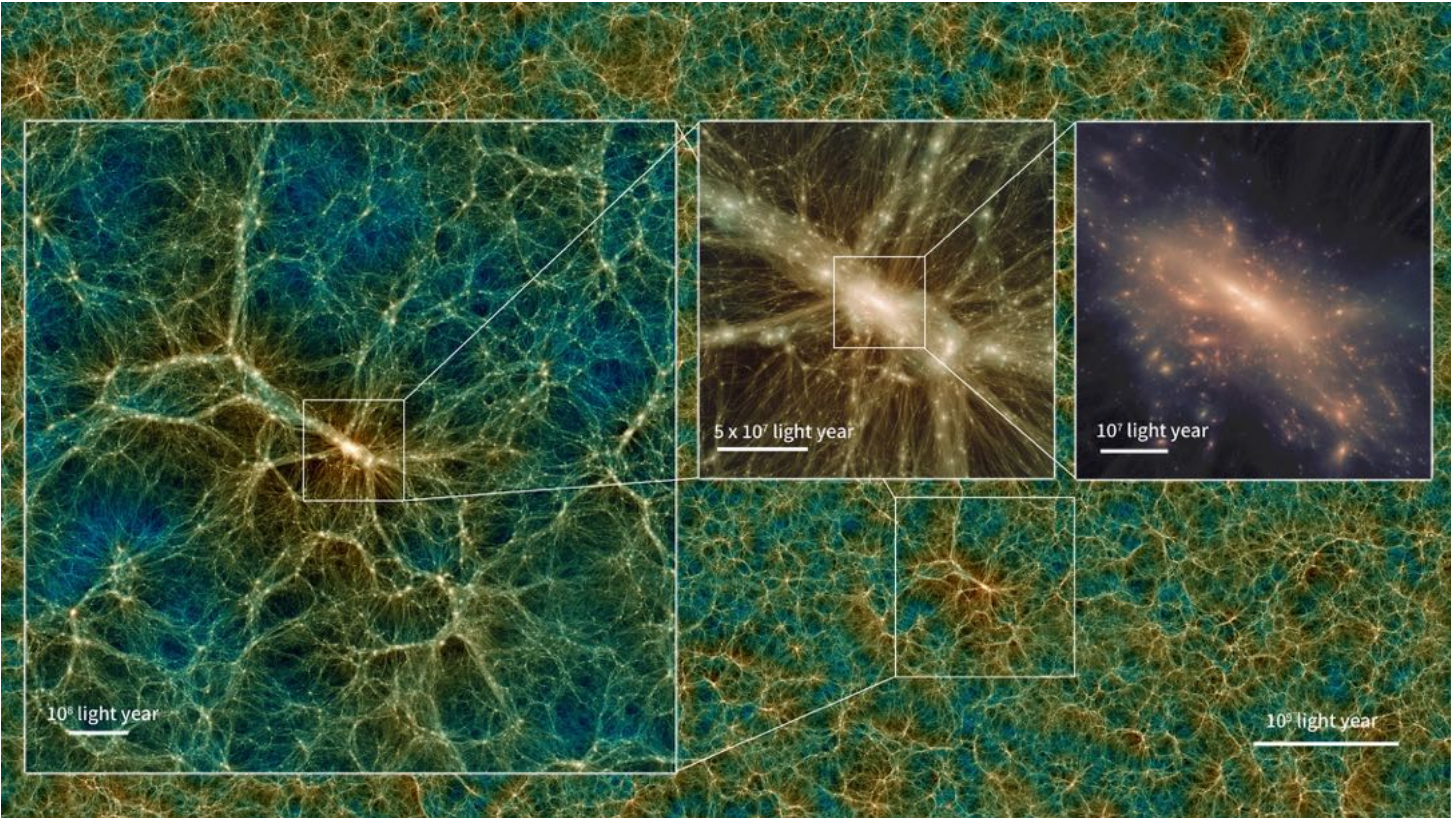
Observar el universo es solo la mitad del trabajo. La otra mitad consiste en entender lo que vemos. Y, para eso, los cosmólogos necesitan una herramienta muy poderosa: las simulaciones numéricas del cosmos. Entre ellas, las llamadas simulaciones de N-cuerpos ocupan un lugar central, pues nos permiten recrear, paso a paso, la evolución de la estructura a gran escala desde los primeros instantes del universo hasta la actualidad.

¿En qué consisten estas simulaciones? En esencia, consisten en modelar cómo evoluciona un gran número de partículas que representan la materia oscura —el ingrediente dominante en la formación de estructuras— bajo la influencia de la gra-

vedad. Cada partícula interactúa con las demás y, al integrar sus trayectorias durante miles de millones de años virtuales, los científicos pueden ver cómo se forman cúmulos, filamentos, vacíos y halos de materia que darán lugar a las galaxias.

Una de las simulaciones más ambiciosas jamás realizadas en este campo es Uchuu (que significa “universo” en japonés). Esta colosal simulación, realizada por un consorcio internacional liderado por científicos de Granada y Chiba, en Japón, modela más de dos billones de partículas en un volumen de diez mil millones de años luz de lado. Gracias a su enorme resolución y tamaño, Uchuu nos ofrece un retrato extremadamente detallado de cómo se organiza la materia en el cosmos a gran escala.

Simulaciones como Uchuu son importantes para proyectos como DESI porque sin ellas sería imposible interpretar los datos observacionales con precisión



La distribución de la materia oscura en una instantánea de Uchuu. Las imágenes muestran el halo de materia oscura del mayor cúmulo de galaxias formado en la simulación a diferentes aumentos. (Crédito: Tomoaki Ishiyama)

¿Pero por qué son tan importantes simulaciones como Uchuu para proyectos como DESI? Porque sin ellas sería imposible interpretar los datos observacionales con precisión. Por un lado, nos permiten generar catálogos sintéticos de galaxias como las observadas con DESI, donde sabemos con exactitud qué leyes físicas se han aplicado. Estos catálogos sirven como banco de pruebas para nuestras técnicas estadísticas y nos ayudan a estimar los errores y sesgos de nuestros análisis, algo fundamental cuando trabajamos con millones de objetos y queremos medir efectos muy sutiles, como las oscilaciones acústicas bariónicas (BAO) o la distorsión del espacio-tiempo por materia oscura.

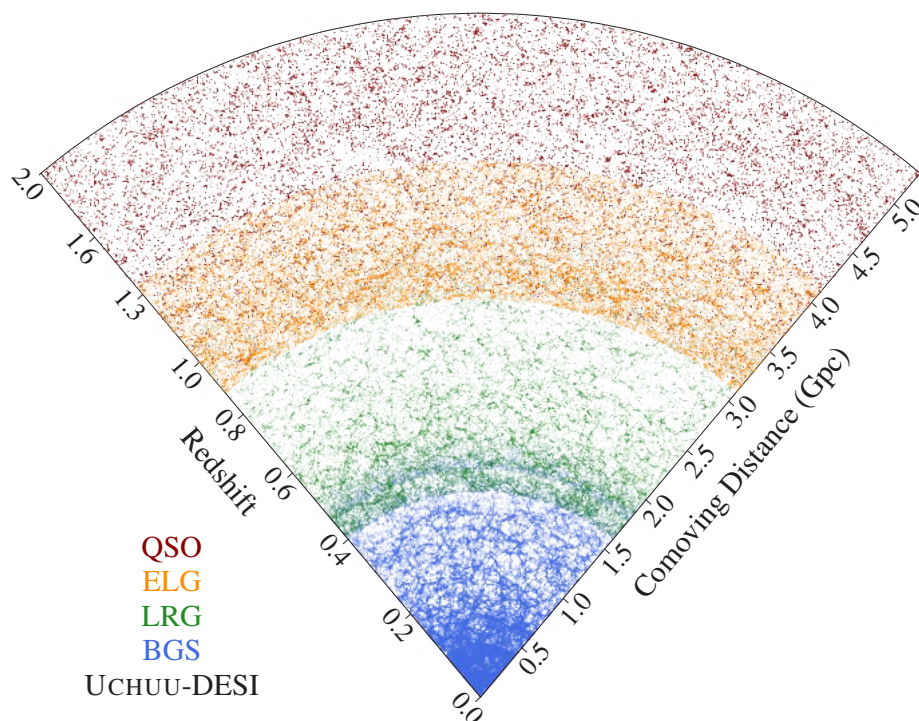
Además, las simulaciones permiten explorar distintas cosmologías. Podemos cambiar los parámetros fundamentales — como la densidad de materia, la constante de Hubble o la naturaleza de la energía oscura — y ver cómo cambian las estructuras resultantes. Así, cuando comparamos los datos reales de DESI con los resultados simulados, podemos descartar modelos que no encajan y afinar nuestras teorías sobre el origen y evolución del universo.

Necesitamos simular el universo para entender el que vemos

Uchuu tiene una ventaja añadida: no solo simula la materia oscura, sino que sus datos se pueden enriquecer con modelos de formación de galaxias y efectos observacionales. Esto permite construir cartografiados que reproducen lo que vería un telescopio desde la Tierra y aplicar errores sistemáticos similares a los que sufre un cartografiado real como DESI. El resultado es un “universo virtual” extremadamente realista, que podemos analizar con las mismas herramientas que usamos en los datos reales.

En resumen, las simulaciones de N-cuerpos son el laboratorio teórico del cosmólogo. Y proyectos como Uchuu son esenciales para que el enorme caudal de datos que genera DESI pueda traducirse en conocimiento. En un sentido muy real, necesitamos simular el universo para entender el que vemos.

Además, el grupo de DESI en el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) ha generado cartografiados sintéticos utilizando la simulación Uchuu, replicando con gran precisión las condiciones del cartografiado real. En particular, se han construido catálogos simulados que cubren el



Visualización de una porción del universo simulado usando los catálogos Uchuu-DESI, donde los objetos están coloreados según su tipo: galaxias BGS (azul), LRG (verde), ELG (naranja) y cuásares QSO (rojo). La imagen muestra una cuña de 80 grados de ancho, proyectada en coordenadas que representan distancias reales en el universo, usando un modelo cosmológico basado en las observaciones de Planck. CRÉDITOS: PRADA ET AL. 2024.

1% del área total del cartografiado DESI, aplicando los mismos errores instrumentales y criterios de selección que afectan a los datos observacionales. Este paso es crucial para validar nuestras metodologías de análisis, ya que nos permite cuantificar sistemáticamente los sesgos y errores en la interpretación de los datos. Actualmente, se está extendiendo este trabajo para generar catálogos de galaxias coherentes con las observaciones tras uno y tres años de datos, lo que proporcionará una base robusta para las futuras comparaciones cosmológicas y la extracción de parámetros fundamentales del universo.

EL FUTURO DEL UNIVERSO

La estructura a gran escala del universo que estamos cartografiando hoy es solo una instantánea de un momento en la historia cósmica. El universo está en constante evolución, impulsado por fuerzas que apenas estamos empezando a entender. La energía oscura continúa acelerando la expansión, estirando el espacio y haciendo que las galaxias distantes se alejen cada vez más rápido.

En el futuro lejano, esta aceleración podría llevar a escenarios dramáticos. Si la energía oscura continúa fortaleciéndose, podría eventualmente superar no solo la gravedad a gran escala, sino también las fuerzas que mantienen unidas a las ga-

laxias, los sistemas estelares e, incluso, los átomos. Este escenario, conocido como el “Gran Desgarramiento”, representa uno de los posibles destinos finales del universo.

Pero también es posible que la energía oscura cambie con el tiempo, como sugieren algunos de los primeros resultados de DESI. Si la energía oscura se debilita, la expansión del universo podría desacelerarse e incluso invertirse, llevando eventualmente a un “Gran Colapso”. O tal vez la energía oscura se comporte de maneras que aún no hemos imaginado, llevando al universo por caminos que ni siquiera podemos predecir.

Cada nuevo descubrimiento nos acerca un paso más a entender nuestro lugar en este cosmos vasto y misterioso

Lo que es seguro es que cada nuevo descubrimiento nos acerca un paso más a entender nuestro lugar en este cosmos vasto y misterioso. En este gran proyecto de cartografiar y entender el universo, cada observación de DESI, cada partícula simulada en Uchuu, y cada nuevo análisis teórico nos acerca un poco más a responder las preguntas más profundas que la humanidad se ha planteado: ¿cómo surgió el universo que observamos y cuál será su destino final?



Uchuu nos ofrece un retrato extremadamente detallado de cómo se organiza la materia en el cosmos a gran escala

REPORTAJE

La Función Inicial de Masa

Una pieza clave para entender la formación estelar

Por Núria Miret Roig (Universidad de Barcelona)

La distribución de masas con la que nacen las estrellas, conocida como Función Inicial de Masa (IMF, por sus siglas en inglés), es un parámetro fundamental en astrofísica. Su forma influye directamente en la evolución química, energética y dinámica de las galaxias, así como en la formación de estrellas, enanas marrones y planetas interestelares.

LA IMF Y SU RELACIÓN CON LA FORMACIÓN ESTELAR

Las estrellas no se forman de manera aislada, sino en grupos de estrellas que solemos llamar cúmulos. Cuando una nube molecular se vuelve inestable y empieza a colapsar, pasa por un proceso de fragmentación que la divide en núcleos de distinta masa, cada uno de los cuales podrá acabar dando lugar a una o varias estrellas. La IMF describe estadísticamente cuántas estrellas se forman en función de su masa inicial.

La IMF permite estimar cuántas estrellas masivas se formarán en una región y, por tanto, anticipar su contribución al enriquecimiento químico del medio interestelar

La fragmentación de la nube madre y la forma final de la IMF dependen de las propiedades físicas de la nube, como la temperatura, la densidad, la turbulencia, la retroalimentación de estrellas ya formadas y los campos magnéticos. Si bien existen intentos teóricos por derivar la IMF desde principios fundamentales, en la práctica, esta se obtiene mediante simulaciones hidrodinámicas y observaciones directas de cúmulos estelares y galaxias.

LA IMPORTANCIA DE LA IMF

La IMF permite estimar cuántas estrellas masivas se formarán en una región y, por tanto, anticipar su contribución al enriquecimiento químico del medio interestelar. Este proceso se refiere al aumento de elementos pesados, es decir, todos aquellos que no sean hidrógeno, helio o litio. Estos elemen-

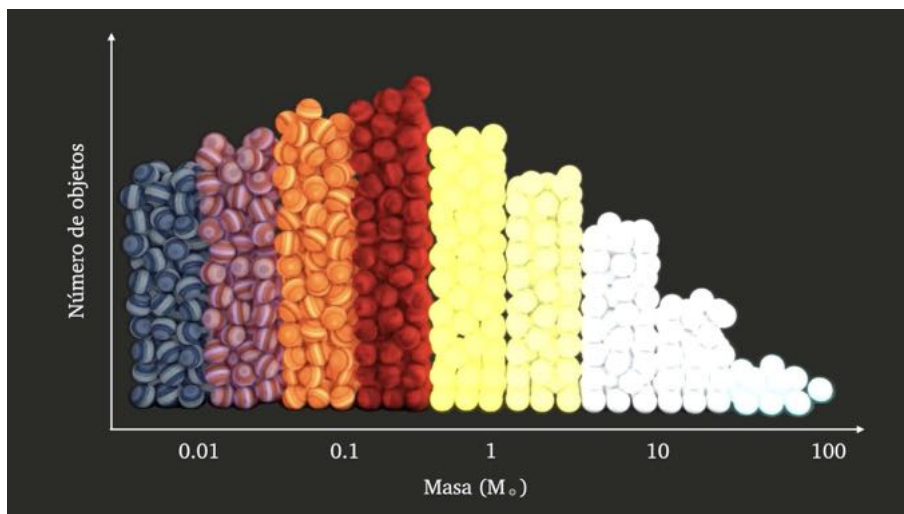


Ilustración de la función inicial de masa. En esta representación esquemática se muestra el número de estrellas y objetos subestelares en distintos rangos de masa. Crédito: H. Bouy

tos se generan en las reacciones nucleares que ocurren en el interior de las estrellas y se dispersan a través de vientos intensos y supernovas.

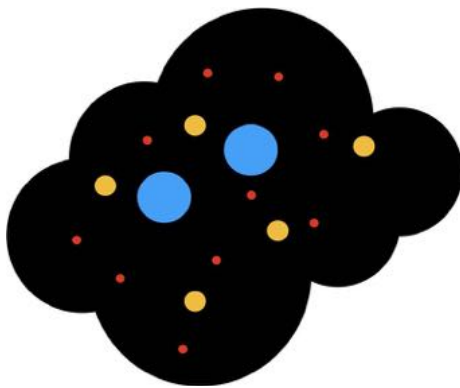


Ilustración de la fragmentación de una nube molecular para dar lugar a un cúmulo de estrellas. Por cada estrella masiva que se forma hay muchas más de menor masa. Fuente propia.

Aunque escasas, las estrellas más masivas ($M > 8$ masas solares) producen la mayor cantidad de elementos pesados. Debido a su corta vida, enriquecen rápidamente su entorno y juegan un papel fundamental en la retroalimentación energética y química de las galaxias. En cambio, las estrellas de baja masa son mucho más longevas, estables y numerosas. Su impacto químico es menor, pero dominan la masa estelar total en mu-

chas galaxias, siendo cruciales para entender su dinámica.

¿QUÉ NOS DICEN LAS OBSERVACIONES?

Desde el trabajo pionero realizado por Salpeter en 1955, se ha observado que las estrellas de baja masa son mucho más abundantes que las masivas. Modelos posteriores, como los de Kroupa (2001) y Chabrier (2003), han refinado esta descripción. La Función Inicial de Masa tiene su pico en aproximadamente una masa solar y va bajando hasta masas más pequeñas.

Actualmente, se acepta que la IMF alcanza su máximo en torno a las enanas rojas (estrellas de baja masa, entre 0.08 y 0.45 masas solares), determinando el tipo de estrellas más frecuentes del universo. Además, que la IMF tenga un máximo y no sea una simple ley de potencias en todo su rango, contiene información importante sobre la formación estelar, las condiciones iniciales y los procesos de fragmentación de la nube madre.

Detectar objetos de muy baja masa sigue siendo un reto observacional. Su emisión, predominantemente en el infrarrojo, disminuye con el tiempo; por ello, los estudios más completos se centran en regiones de formación estelar cercanas a la vecindad solar, donde estos objetos aún son relativamente jóvenes y brillantes.



LA FORMACIÓN DE ENANAS MARRONES Y PLANETAS INTERESTELARES SEGÚN LA IMF

En la década de los sesenta se predijo la existencia de enanas marrones, objetos cuya masa (entre ~13 y 75 masas de Júpiter, M_{Jup}) no permite la fusión del hidrógeno, aunque sí pueden sostener brevemente reacciones de deuterio o litio. Las primeras confirmaciones de la existencia de estos objetos llegaron en 1995 con el descubrimiento de Gliese 229B, una enana marrón orbitando una estrella de baja masa, y Teide 1, el primer candidato aislado, miembro del cúmulo de las Pléyades y descubierto por un equipo de investigadores españoles (Rebolo et al. 1995, 1996)

A principios de los 2000 se empezaron a detectar objetos aún menos masivos que las enanas marrones, los llamados planetas interestelares o planetas flotantes. Estos cuerpos, de masas inferiores a $13 M_{\text{Jup}}$, se distinguen de las enanas marrones porque no presentan reacciones nucleares en sus interiores y de los planetas porque no orbitan estrellas. Equipos españoles han liderado estudios pioneros en la detección de planetas interestelares (ver, por ejemplo, Zapatero Osorio et al. 2000, Peña Ramírez et al. 2012).

Estudios recientes de regiones de formación estelar, como Upper Scorpius y Ophiuchus, han revelado una población inesperadamente numerosa de planetas interestelares. Los planetas interestelares son hasta siete veces más

frecuentes que lo predicho por las simulaciones numéricas, sugiriendo una revisión de los modelos de formación subestelar. ¿Se trata de objetos formados por colapso directo, como las estrellas, o son planetas expulsados de sistemas planetarios? La IMF es un parámetro clave para comparar teoría y observaciones, así como para avanzar en la comprensión de su origen.

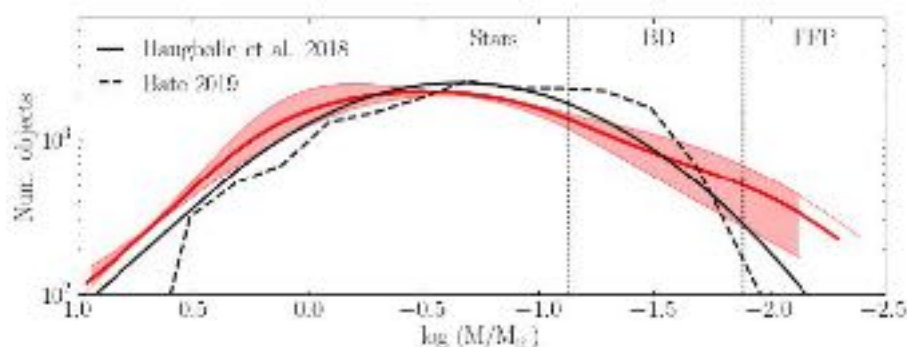
Estudios recientes de regiones de formación estelar, como Upper Scorpius y Ophiuchus, han revelado una población inesperadamente numerosa de planetas interestelares

¿ES LA IMF UNIVERSAL?

Una de las cuestiones más debatidas actualmente es si la IMF es realmente universal

o si varía en función del ambiente. En el régimen estelar, las observaciones en cúmulos de distintas metalicidades y entornos galácticos (como núcleos de galaxias elípticas) han mostrado resultados mixtos. Aunque algunas variaciones con las condiciones del entorno parecen probables, aún es difícil determinar si las diferencias son intrínsecas o si, por el contrario, se deben a incertidumbres estadísticas y observacionales.

En el régimen subestelar, estudios recientes sugieren que la fracción de planetas interestelares y sus propiedades (como la fracción de binarias y discos) podría variar significativamente con las condiciones del entorno. Sin embargo, se requieren más estudios que alcancen hasta pocas masas de Júpiter para confirmar estos resultados. Esperamos que muchos planetas interestelares sean descubiertos en los próximos años, gracias a los telescopios espaciales más avanzados como el telescopio espacial James Webb (JWST) y futuros telescopios terrestres como el ELT.



Función de masa de la región de Upper Scorpius y Ophiuchus (rojo). El número de planetas interestelares detectados sobrepasa en un factor 7 el número esperado por las simulaciones de formación estelar actuales (negro). Crédito: Miret-Roig et al. 2022.

ENTREVISTA A IGNASI RIBAS

Presente y futuro en la investigación exoplanetaria

Realizada por Sebastiano de Franciscis (IAA-CSIC)

Ignasi Ribas Canudas es director del Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña (IEEC) e investigador en el Instituto de Ciencias del Espacio (ICE) del CSIC. Es experto en exoplanetas y participa activamente en proyectos de instrumentación para el descubrimiento y la caracterización de nuevos planetas similares a la Tierra, como CARMENES, en el observatorio de Calar Alto, del cual es investigador principal, y en las misiones espaciales Cheops, PLATO y Ariel, de la ESA.



El pasado 13 de febrero, Ignasi impartió la charla "Present and future of exoplanet research" en el IAA-CSIC en el marco de los Coloquios Severo Ochoa. Posteriormente lo entrevistamos para profundizar en algunos de los temas tratados en su visita a Granada, y conocer más sobre los pilares e incertidumbres de la ciencia exoplanetaria.

Para contextualizar, ¿podrías ofrecer una visión general de las misiones exoplanetarias del pasado, presente y futuro?

Empezaría por COROT (CONvection ROTation et Transits planétaires), una misión de la ESA junto con la Agencia Espacial Francesa (CNES), lanzada en 2006, que descubrió la primera supertierra, Corot-7 b. Por lo tanto, fue una misión pionera que inició el largo camino de detección de otras Tierras.

Luego Kepler (NASA) nos proporcionó estadísticas masivas, pero no pudo cumplir con su objetivo de encontrar sistemas gemelos de la Tierra. Detectó unos 4000 exoplanetas, pero su precisión se vio afectada por la actividad de las estrellas solares anfitrionas, que era más alta de lo previsto.

La actual misión TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite, NASA), observa planetas alrededor de estrellas brillantes, y trabaja de manera sinérgica con observaciones complementarias desde tierra y espacio. Por ejemplo, con el JWST (James Webb Space Telescope, NASA), que mide propiedades atmosféricas de los exoplanetas.

Cheops (CHaracterising EXoplanets Satellite, ESA), en un principio pretendía hacer un seguimiento de planetas con velocidad radial ya medida y encontrar tránsitos. No obstante, este objetivo no se pudo alcanzar y se replan-

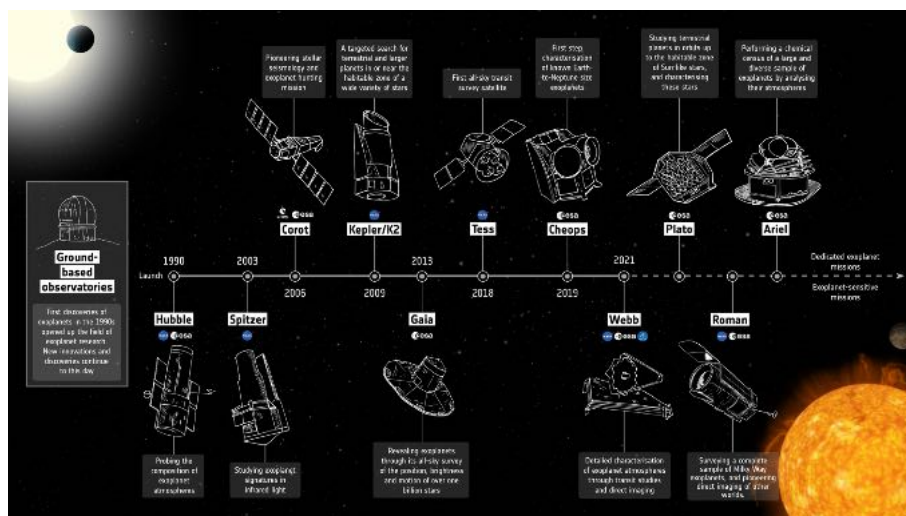
teó en favor de estudiar de forma precisa planetas con tránsitos y complementar la misión TESS para obtener información completa de sistemas planetarios.

Finalmente llegamos al futuro cercano, a PLATO (PLANetary Transits and Oscillation of Stars, ESA), que tiene dos características importantes. La primera es que buscará planetas con periodos largos en estrellas brillantes, y, por lo tanto, será posible medir velocidades radiales desde la Tierra. La segunda característica clave de Plato es que podrá caracterizar la estrella anfitriona de manera completa, hasta midiendo su edad. Esa caracterización será de gran ayuda para el desarrollo de nuevos modelos de formación planetaria y de evolución. Es probable que esta sea la mayor contribución de Plato: la introducción de una etiqueta de edad.

En tu charla mencionaste seis técnicas de detección de exoplanetas: medición de velocidades radiales, tránsitos, astrometría, gravitacional microlensing (microlente gravitatoria), cronometraje y direct imaging (imagen directa). ¿Qué podemos esperar del desarrollo futuro de estas técnicas?

En general todas estas técnicas se pueden potenciar más. La misión Plato llevará aún más allá el método de los tránsitos, estudiando periodos orbitales muy largos en estrellas anfitrionas brillantes. Eso permitirá la exploración de una nueva región del espacio de parámetros, pues la misión de la NASA Kepler observaba una región del espacio pequeña y profunda y, por otra parte, TESS estudia periodos orbitales cortos en casi todo el cielo.

En cuanto a la astrometría, que mide el cambio de la posición aparente de una estre-



Cronología de misiones exoplanetarias. Crédito: ESA

lla (*star wobble*) debido a la presencia de un exoplaneta, estamos a la espera de una revolución que la misión Gaia aportará en menos de 2 años, cuando se publicará el Data Release 4 (DR4). En el DR4 tendremos datos astrométricos, por épocas, de los 5 años de duración de la misión, y probablemente pasaremos de los actuales 6.000 exoplanetas confirmados a más de 10.000.

Con los datos de Gaia, probablemente pasaremos de los actuales 6.000 exoplanetas confirmados a más de 10.000

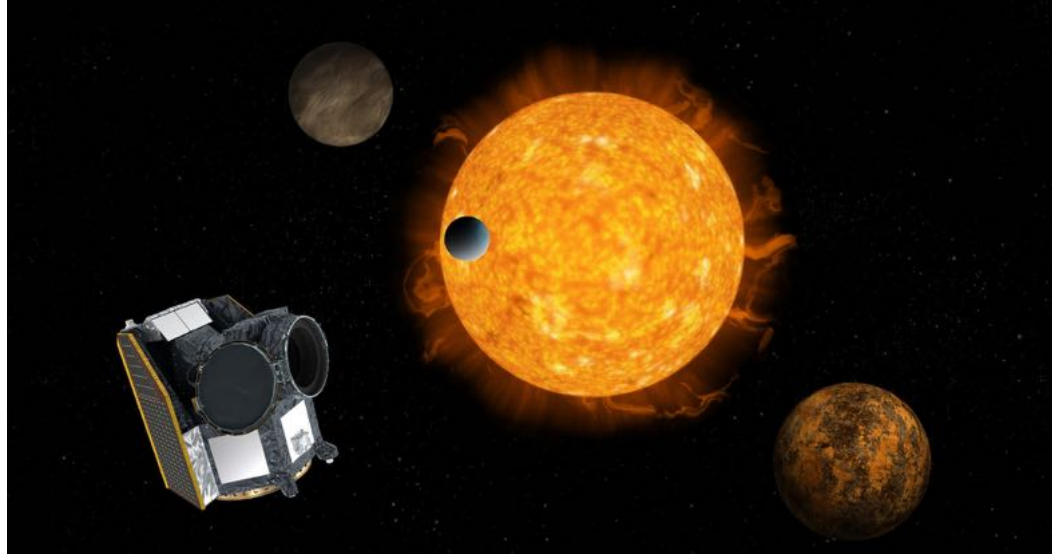
La técnica de la microlente gravitatoria (*gravitational microlensing*) está basada en la amplificación de luz de una estrella distante a causa del pozo gravitacional causado por el paso de un objeto-lente a distancia más corta. En el caso de que el pozo sea generado por un sistema planeta-estrella observaríamos, en una serie temporal de imágenes, también, un pico de amplificación correspondiente al efecto de lente del planeta. Es una técnica muy potente, pero solo desde el punto de vista estadístico, ya que se puede obtener sólo una medida: cuando se produce el efecto de lente. Con esta técnica resulta posible medir la distancia orbital y la masa, pero hay cierta degeneración, debido al efecto de la proyección. La microlente gravitatoria tiene todavía potencial gracias a diversos muestreos desde tierra y desde el espacio, pero son actualmente bastante caros.

El método del cronometraje se basa en observar objetos con una periodicidad bien determinada (estrellas pulsantes, binarias eclipsantes, púlsares), puesto que el movimiento alrededor del centro de masa a causa de un exoplaneta produce cambios en el periodo de la señal. Sería como tener un reloj en órbita y calcular su atraso o adelanto.

La limitación de esta técnica, en este caso, deja de ser instrumental, sino que depende del estado del arte de la propia astrofísica, es decir, necesitamos conocer de manera muy precisa y detallada las pulsaciones, y eso depende del desarrollo de los modelos. Por ejemplo, en el caso de estrellas pulsantes, en cuánto podemos avanzar en astrosismología teórica. En 1992, fue este método, precisamente, el que permitió a Aleksander Wolszczan y Dale Frail descubrir los primeros exoplanetas, orbitando alrededor del púlsar PSR 1257+12.



Astrosismología. Créditos: ESA/ATG



Impresión artística de Cheops, el satélite de caracterización de exoplanetas, con un sistema exoplanetario al fondo. Créditos: ESA/ATG medialab

El avance más puntero, pero también el más ambicioso, lo hará la técnica de imagen directa (*direct imaging*) en los próximos 20 años. Estoy pensando en la misión ROMAN (NASA) en el inmediato futuro, *Habitable Worlds Observatory* (HWO, NASA) y, potencialmente, el *Large Interferometer For Exoplanets* (LIFE, ESA) a más largo plazo.

Hablas en tu charla de “un zoológico”, haciendo referencia al conjunto de planetas descubiertos por CARMENES. ¿Cuál es la propiedad más destacada, más novedosa, más inesperada que habéis encontrado en este “zoo”?

Te puedo hablar no de una, sino de dos propiedades importantes que vemos con CARMENES.

Primeramente, hemos descubierto una cantidad sorprendente de planetas gigantes alrededor de estrellas de muy baja masa. Esto está en desacuerdo con los modelos actuales de formación planetaria, y fue claramente una gran sorpresa. Observamos estrellas pequeñas, de en torno a 0.1 masas solares, con uno o dos Júpiteres.

Descubrimos que hay una enorme abundancia de planetas con una masa parecida a la de la Tierra alrededor de estrellas de baja masa

Además de esto, descubrimos, con gran sorpresa, que hay una enorme abundancia de planetas con una masa parecida a la de la Tierra alrededor de estrellas de baja masa. De hecho, CARMENES ha llevado el límite de estas observaciones a estrellas de 0.1 masas solares, hallando un promedio de 1.5 planetas por estrella en enanas M (con entre 0.1 y 0.6 masas solares). Y si bajamos el umbral de masas estelares a 0.16 masas solares encontramos una abundancia de dos planetas de masa parecida a la Tierra por estrella.

Alrededor de estrellas frías hay sistemas multiplanetarios ricos, como el de la estrella de Teegarden, estudiado por CARMENES en 2019, el cual alberga tres o más planetas gemelos de la Tierra (con la misma masa), dos de los cuales se encuentran en su región de habitabilidad.

Con suficientes medidas y un trabajo profundo de estadística considerando estrellas enanas M de muy baja masa, gracias a CARMENES hemos concluido que el 100% de éstas parece tener planetas de tipo terrestre. Sin embargo, los modelos no predecían tanta abundancia.

Por otra parte, ¿cuál es la proporción de planetas terrestres en el caso de estrellas solares?

Si hablamos de la fracción de estrellas solares (con masas similares a la de nuestro Sol) con planetas de tipo terrestre, rondamos el 15%. Incluyendo minineptunos y supertierras llegaríamos al 50%.



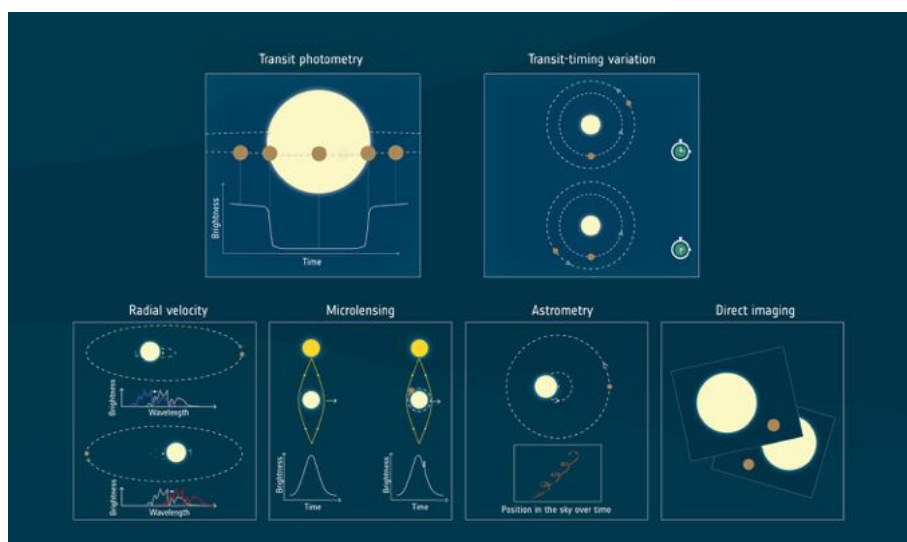
Cúpula del telescopio de 3.5 metros del Observatorio de Calar Alto, emplazamiento de CARMENES, en Almería. Créditos: CAHA

¿Y en cuanto a la habitabilidad? Porque no es lo mismo decir que un planeta sea de tipo terrestre y decir que es habitable...

Esto es cierto. Podemos definir un planeta de tipo terrestre si tiene, aproximadamente menos de 3 veces la masa y 1.5 veces el radio de nuestra Tierra.

En cuanto a la habitabilidad, en una muestra estadística solemos estudiar un parámetro, el *eta tierra* ($\eta_{\oplus}$), es decir, la frecuencia de planetas terrestres en zona habitable (cuya temperatura y presión superficial es compatible con la presencia de agua en estado líquido). La misión Kepler situó el $\eta_{\oplus}$ alrededor del 15-20%, aunque no hay un consenso claro. Sí sabemos que la muestra está dominada por estrellas de tipo solar.

En el caso de las enanas M, el valor de $\eta_{\oplus}$ es más alto, aunque no la tenemos calculada aún en la muestra de CARMENES, pues aún tenemos una estadística pequeña. Sin



Métodos de detección de exoplanetas. Créditos: ESA

embargo, para estrellas de muy baja masa, de menos de 0.15 masas solares, las cuales además tienen una estructura totalmente convectiva, apuesto que no será muy inferior al 100%.

En todo caso, un dato claro es que la probabilidad de tener planetas, en general, y planetas terrestres, en concreto, es más alta en estrellas frías de tipo M que en estrellas de tipo solar.

¿Cuál dirías que es el estado del arte y qué dificultades existen en cuanto a la realización de modelos que describan la transición entre planetas rocosos y gaseosos?

Por lo general, si un planeta tiene una masa elevada, tiene que ser gaseoso, mientras si su masa es menor, será pobre en volátiles, y, por tanto, rocoso, como la Tierra. En la transición entre estos dos escenarios se encuentran los 'Neptunos pequeños', cuya naturaleza no está del todo clara.

Pero es importante también tener en cuenta la historia de la formación de un planeta y su dinámica. Hay procesos como la pérdida de atmósfera y la fotoevaporación que no se comprenden aún del todo bien y dependen de la radiación de alta energía que emite la estrella, cuya historia también resulta difícil de determinar.

Si nos preguntamos: ¿un planeta de cinco masas terrestres es gaseoso o rocoso? La respuesta será que hay de los dos ¡y hasta de diez masas terrestres! Por otra parte, hemos encontrado planetas de dos masas terrestres que son gaseosos. El diagrama masa-radio, pues, estaría degenerado en esta región.

En la transición entre planetas gaseosos y rocosos hay mucha información por recolectar y por entender. Parece que hay dos regímenes de radios, y, en mitad, el *radius valley* (región de radios donde baja la frecuencia de exoplanetas). Pero no sabemos si estamos frente a un fenómeno estático, si el valle se produce de forma primordial o si hay procesos de fotoevaporación que tienden a eliminar los planetas.

En 2022, Luque y Pallé, en su artículo de *Science* "Density, not radius, separates rocky and water-rich small planets orbiting M dwarf stars", proponen la existencia de tres familias de planetas: rocosos, gaseosos y planetas de agua (*water worlds*).

Definitivamente, en esta región dudosa, en la línea divisoria entre los que tienen gas y los que no – la denominada *cosmic shoreline*-, hay que estudiar no sólo una dimensión, sino más. Añadir a estos estudios la dimensión de la edad evolutiva de la estrella anfitriona claramente será de ayuda.

La detección de atmósferas exoplanetarias está limitada por la actividad de la estrella anfitriona, la cual es necesario modelar de manera muy fina y exacta. Aquí es donde entra tu último proyecto, SPOTLESS. ¿Qué nos puedes contar de él?

A pesar de tener ahora instrumentos fantásticos como CARMENES, HARPS, ESPRESSO o JWST, el factor limitante sigue siendo el ruido. Es esencial tener una herramienta para comprender y eliminar este factor de contaminación. Estoy dando vueltas a este proyecto desde hace diez años. Yo vengo del campo de la astrofísica estelar y ya había trabajado en el pasado en actividad estelar magnética y hace un par de años les dimos un impulso más, porque ahora es evidente que tiene una aplicación directa, que la contaminación de la actividad estelar es más relevante que nunca.

Mi aproximación se plantea eliminar esta contaminación usando modelos físicos, basados en la física estelar que conocemos desde hace décadas, y tratar la actividad estelar como una fuente de señal. No sería entonces una fuente de ruido, sino un fenómeno físico comprensible y estudiable.

Nuestro modelo estelar, que llamamos StarSim, tiene como objetivo construir un gemelo digital de una estrella activa, con manchas y fáculas. Después de generar series temporales con StarSim, empleando los parámetros físicos observacionales, usamos una IA para determinar cuáles de estos mo-

delos se asemeja más a la señal observada. Esto nos permite desacoplar de la señal la posible influencia de un exoplaneta y de su atmósfera.

Nuestro modelo estelar, que llamamos StarSim, tiene como objetivo construir un gemelo digital de una estrella activa, con manchas y fáculas

La filosofía de fondo de nuestro proyecto está en que el método es *physics-driven*, no *data-driven*.

Concluiste tu charla diciendo que cuatro siglos después de Copérnico estamos en una nueva revolución que cambia nuestro contexto en el universo viviente. Yo creo que, más que una revolución, es una confirmación observacional de lo que los filósofos ya decían desde hace siglos, que traslada al sistema universo lo que el pensamiento moderno post-Darwiniano ya aclaró en el ecosistema terrestre. ¿Qué opinas tú?

A nivel humano el impacto de esta nueva revolución copernicana es, efectivamente, una cura de humildad a lo darwiniano.

Si hallamos vida fuera de nuestro planeta no sólo no somos nada especial en el mundo de la vida en la Tierra, sino que seríamos unos más en el contexto de la vida del universo. Ojalá tengamos pronto alguna evidencia de actividad biológica en otro planeta. Sin embargo, lo más probable es que no sepamos de qué tipo: si son seres unicelulares, básicos o complejos, con algún tipo de inteligencia.

Eso producirá, a mi entender, un efecto transformativo, un cambio social, a nivel de pensamiento y de sensación de pertenencia. Ojalá que si encontramos otro sitio donde haya vida, esto nos haga apreciar mucho más a nuestra Tierra. Los humanos formamos comunidades, grupos familiares, étnicos, naciones, por un proceso de comparación. Me gusta pensar que el hecho de encontrar otra vida en el universo podría llevarnos a desarrollar una conciencia de colectivo planetario, que ahora no tenemos.

Me gusta pensar que el hecho de encontrar otra vida en el universo podría llevarnos a desarrollar una conciencia de colectivo planetario, que ahora no tenemos

Ojalá que, con esta eventual identificación de vida más allá de la Tierra, nos pongamos todos de acuerdo para una gobernanza global y cuidemos más nuestro hogar en el universo.

EL HALLAZGO DE UN PLANETA GIGANTE ALREDEDOR DE UNA ESTRELLA DIMINUTA PONE EN JAQUE LAS TEORÍAS SOBRE LA FORMACIÓN PLANETARIA

EL IAA-CSIC PARTICIPÓ EN EL DESCUBRIMIENTO MEDIANTE OBSERVACIONES CLAVE CON EL TELESCOPIO DE 1,5 METROS DEL OBSERVATORIO DE SIERRA NEVADA (OSN), QUE PERMITIERON CONFIRMAR LA EXISTENCIA DEL PLANETA GIGANTE

Los planetas nacen a partir del material que rodea a las estrellas jóvenes, en lo que se conoce como disco protoplanetario. Si el polvo y el gas de este disco se agrupa y alcanza suficiente masa, puede dar lugar a planetas gigantes. Sin embargo, este proceso depende en gran medida de la masa de la estrella: cuanto menor es la estrella, menos material tiene disponible para formar planetas de gran tamaño.

Por eso resulta tan sorprendente el reciente descubrimiento de un exoplaneta gigante orbitando una estrella diminuta: TOI-6894, una enana roja con solo un 20% de la masa del Sol. Este hallazgo, publicado en *Nature Astronomy*, desafía las teorías actuales en torno a la formación planetaria y abre nuevas preguntas sobre cómo y dónde pueden surgir los planetas gigantes. “Lo singular es que, según las teorías actuales, estrellas tan pequeñas no deberían tener planetas tan grandes, porque no tendrían suficiente material a su alrededor como para formarlos”, confirma Francisco J. Pozuelos, investigador del IAA-CSIC que participa en el estudio.

TOI-6894b es un planeta gigante gaseoso de baja densidad, con un radio algo mayor que el de Saturno, pero con solo la mitad de su masa. Su estrella, TOI-6894, es la de menor masa en la que se ha descubierto un planeta gigante en tránsito, con apenas el 60% del tamaño de la siguiente estrella más pequeña conocida con un planeta similar.

El descubrimiento se enmarca dentro de un proyecto de investigación a gran escala que analiza los datos de la misión TESS de la NASA en busca de planetas gigantes alrededor de estrellas de baja masa.

El IAA-CSIC tuvo un papel destacado en el análisis de los datos obtenidos por la misión espacial TESS. “Pudimos detectar que el tránsito de este planeta, es decir, su paso por delante de la estrella, bloquea un 17% de su luz, algo poco común que nos permitirá estudiar su atmósfera con gran precisión”, señala Pozuelos. Este indicio fue el punto de partida de toda la campaña de observación y análisis que culminó en el descubrimiento.

Asimismo, el IAA-CSIC contribuyó de forma clave con observaciones realizadas desde el telescopio de 1,5 metros del OSN, en distintas bandas de luz y en coordinación con otros telescopios internacionales.

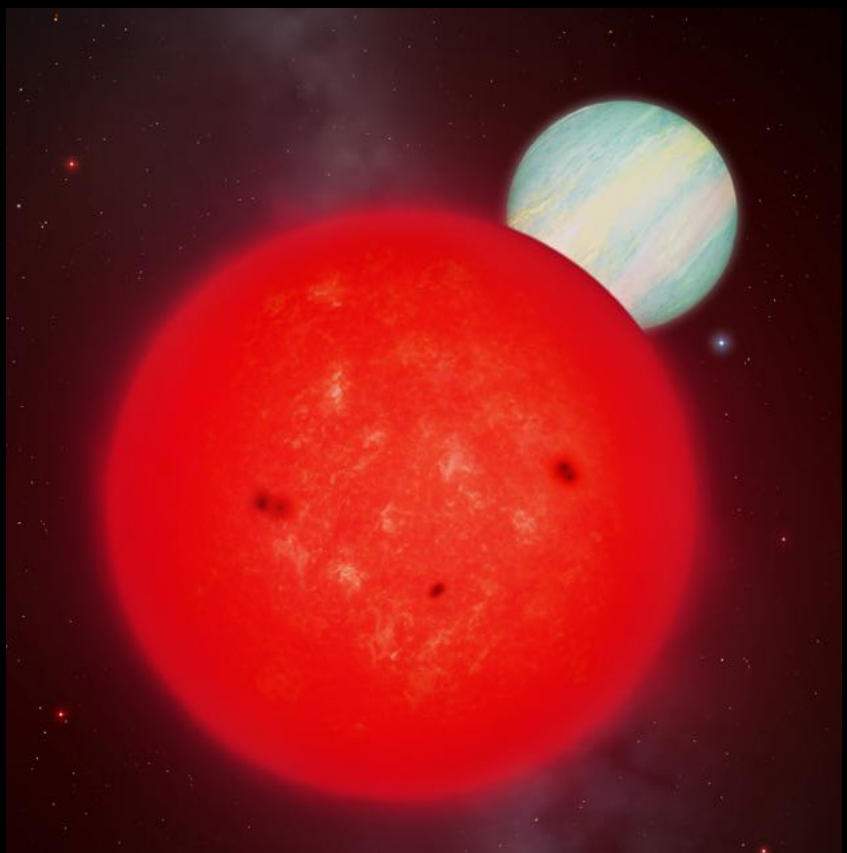
Estas observaciones permitieron descartar que se tratara de una estrella doble eclipsante —un sistema formado por dos estrellas que orbitan entre sí y, al pasar una por delante de la otra, producen eclipses mutuos— y confirmar que, en efecto, era un planeta gigante.

UNA ATMÓSFERA REVELADORA

Una de las claves para entender cómo se formó TOI-6894b está en el estudio detallado de su atmósfera. Analizar cómo se distribuyen los materiales en su interior puede revelar la estructura de su núcleo y ayudar a determinar si se originó por acreción —acumulando lentamente gas y polvo— o por colapso gravitacional de un disco inestable.

Además, su atmósfera presenta una característica poco habitual en este tipo de planetas: es sorprendentemente fría. Mientras que la mayoría de los gigantes gaseosos descubiertos hasta ahora son los llamados “Júpiteres calientes”, con temperaturas entre 1000 y 2000 kelvin, TOI-6894b apenas alcanza los 420 kelvin. Su baja temperatura, junto con otras particularidades como tránsitos especialmente profundos, lo convierte en uno de los candidatos más prometedores para investigar atmósferas frías en exoplanetas.

Gracias a todas estas particularidades, TOI-6894b ha sido seleccionado para futuras observaciones con el telescopio espacial James Webb, previstas en los próximos meses. “Estos datos nos permitirán poner a prueba las distintas teorías sobre su formación y, en general, avanzar en la comprensión de cómo se forman planetas gigantes en entornos extremos”, concluye Pozuelos.



Representación artística del exoplaneta TOI-6894b orbitando su pequeña y fría estrella anfitriona. Créditos: University of Warwick/Mark Garlick

EL MOBY DICK DE...

... BEATRIZ APARICIO (IAA-CSIC)



Beatriz es ingeniera electrónica por la Universidad de Granada.

Está especializada en diseño, desarrollo simulación y test de FPGAs para instrumentación espacial.

Empezó trabajando para el Observatorio de Sierra Nevada y posteriormente pasó a trabajar en proyectos para el espacio. A lo largo de su carrera ha participado en los proyectos ExoMars-NOMAD, PLATO, IMAX II, IMAX III SCIP (Sunrise), PHI (Solar Orbiter) y PMI (Vigil).

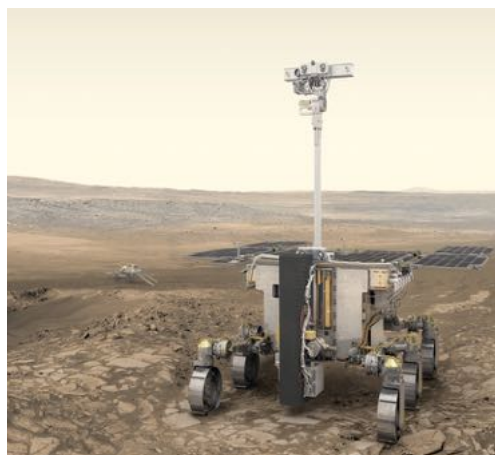
CONSTRUIR PARA EL ESPACIO

Desde muy pequeña he sentido fascinación por el espacio. Recuerdo ver documentales sobre el universo y entusiasarme con toda esa inmensidad por descubrir. Quería viajar a todos esos lugares y conocer nuevos horizontes inexplorados.

Más tarde, descubrí la física, me especialicé en electrónica y la rama de lógica llamó poderosamente mi atención.

Nada más entrar en el IAA-CSIC empecé programando sistemas de control para el Observatorio de Sierra Nevada (OSN). Aunque es fascinante el manejo de los telescopios, sus instrumentos, y hay mil anécdotas que contar de las subidas a observatorio, cuando tuve la oportunidad de trabajar diseñando sistemas espaciales no lo dudé. Descubrí entonces el mundo de las FPGAs (*Field Programmable Gate Array* o Matriz de Puertas Lógicas programable, en español), unos dispositivos con los que se puede crear “casi” cualquier cosa que requiera electrónica digital.

Mi primer contacto con un proyecto espacial fue con el instrumento NOMAD (*Nadir and Occultation for MArS Discovery*), dentro de la misión ExoMars (ESA). Se trataba de una unidad de procesamiento que leía los datos de los tres espectrómetros de la misión y los ordenaba para su posterior envío a plataforma. Además, gracias al carácter de programación paralelo de las FPGAs, se recogían valores de temperatura, voltajes y corrientes que, aunque no son útiles para la ciencia, son vitales para el buen desarrollo y salud del instrumento.



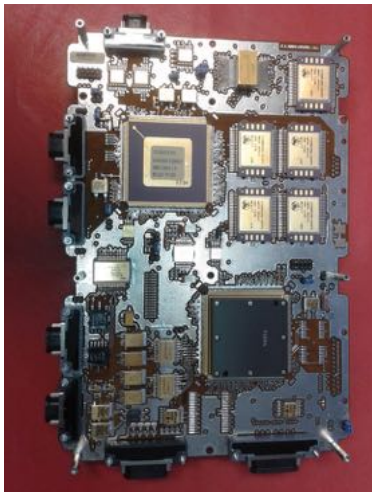
Recreación artística del rover marciano de la misión ExoMars. Crédito: ESA/ATG medialab

Fue con este proyecto cuando descubrí todas las restricciones que conlleva trabajar para el espacio: en un entorno tan hostil (temperaturas extremas, radiación muy alta) la electrónica ha de ser adecuada para cumplir los requisitos de durabilidad y fiabilidad. En ExoMars se usaron dispositivos OTPs (programables solo una vez). Eso proporciona una seguridad extra frente a la radiación, pero implica realizar numerosas pruebas para acabar configurando un chip que puede valer miles de euros. Cualquier fallo es potencialmente catastrófico; aunque la programación sea correcta, es necesario predecir y prepararse para el mayor número de eventualidades posible, ya que una vez en vuelo será imposible llegar hasta el instrumento.



Solar Orbiter cuenta con un conjunto de diez instrumentos científicos para estudiar el Sol. Los hay de dos tipos: in situ, que miden las condiciones que rodean a la propia nave espacial, y de teledetección, que miden lo que ocurre a grandes distancias. Juntos, ambos conjuntos de datos pueden utilizarse para obtener una imagen más completa de lo que ocurre en la corona y el viento solares. Crédito: ESA/ATG medialab

Después de ExoMars me incorporé al grupo de física solar con el *Polarimetric and Helioseismic Imager* (PHI), un espectropolarímetro para la misión Solar Orbiter (ESA). Esto me permitió aventurarme con algo que no había hecho antes: usar las máquinas no para control de flujo de datos y movimiento, sino para procesar imágenes y hacer cálculos complicados.



*A la izquierda, modelo de vuelo de la DPU de ExoMars antes de su integración. Crédito: GIES
A la derecha, vista de las FPGAs en PHI, ya integradas en el modelo de vuelo: Crédito: SPG*



La gran ventaja de las FPGAs es que pueden efectuar tareas en paralelo, como si fueran dispositivos independientes. En el caso de PHI se pretendía realizar, en un tiempo récord y con un único dispositivo ligero y de bajo consumo, la inversión de la ecuación de transporte radiativo (el famoso RTE). Para ello, el equipo formado por Juan Pedro Cobos, José Luis Ramos y yo misma estuvimos diseñando la manera de dividir un solo cálculo matemático muy complejo en varios cálculos más simples que pudieran ejecutarse a la vez y ahorrar tiempo.

Aquella aventura duró unos cuantos años, y más tarde continuó con PMI, un instrumento en cuyo desarrollo estoy inmersa ahora mismo.

PMI (*Photospheric Magnetic field Imager*) es un magnetógrafo que formará parte de los instrumentos a bordo de la misión Vigil (ESA). El objetivo de Vigil es operacional, no científico, y la idea es detectar eventos de tiempo espacial que puedan ser potencialmente dañinos para los satélites y avisar para minimizar el daño. El orbital se posicionará en el punto L5 de Lagrange y podrá tomar datos del Sol de forma continua.

PMI presenta desafíos tecnológicos muy importantes. Al ser una misión de servicio y no de ciencia, los requisitos de fiabilidad y durabilidad son muy fuertes (99% de fiabilidad y, al menos, 10 años de duración de la misión, más 3 años de almacenamiento). Y, al ser en espacio profundo, el uso de dispositivos electrónicos está limitado a aquellos resistentes a radiación. Sin embargo, los dispositivos más robustos en este aspecto no son adecuados para realizar cál-

culos complejos.

Leí una vez que la ingeniería es el arte de buscar el equilibrio. En el caso de PMI, hemos encontrado ese equilibrio optando por un dispositivo, cuya resistencia a la carga total de ionización y a la radiación es ligeramente menor que otras, pero que, a cambio, nos brinda una gran capacidad de cálculo. Aún así, existe el riesgo de que un rayo cósmico impacte en el dispositivo dañándolo permanentemente. Asimismo, podría ocurrir que hubiera una alteración transitoria de algún elemento del chip en cualquier lugar, de manera que al cambiar un 0 por un 1 (o al revés) se modifique el funcionamiento del sistema.

Cuando nos enfrentamos a estas dificultades, además de seleccionar una FPGA adecuada al entorno, hay que utilizar técnicas especiales para proteger el contenido del programa. Una de ellas consiste en triplicar internamente todas las funciones y poner sistemas de votación para eliminar el resultado que difiere de los otros dos.). Debido a la limitada capacidad del dispositivo, debemos seleccionar cuidadosamente las zonas con más riesgo de fallo y las más críticas para triplicar solo esas.

Además de la redundancia en la electrónica, utilizaremos técnicas de codificación especiales para conseguir la máxima fiabilidad y seguridad. Y todo esto, en el caso de PMI, se verá reforzado con la reconfiguración total de la FPGA cada 15 minutos.

Esta estrategia nos permitirá dos cosas. Por un lado, aumenta la capacidad de procesamiento de la FPGA, ya que habrá dos bitstreams (archivos de configuración) diferentes que se irán alternando. Por otro lado, corregir cualquier posible fallo transitorio que pueda surgir debido a la radiación, ya que, al reprogramar, los efectos de las alteraciones por eventos unitarios son eliminados.

Ya veis que mi Moby Dick sigue nadando y poniendo inconvenientes a la exploración espacial, pero poco a poco vamos sorteando las dificultades y consiguiendo retos cada vez más complicados, tanto en procesamientos cada vez más ambiciosos como en duración. Esperemos que continúe este viaje apasionante, al que claramente aún le queda mucho camino.

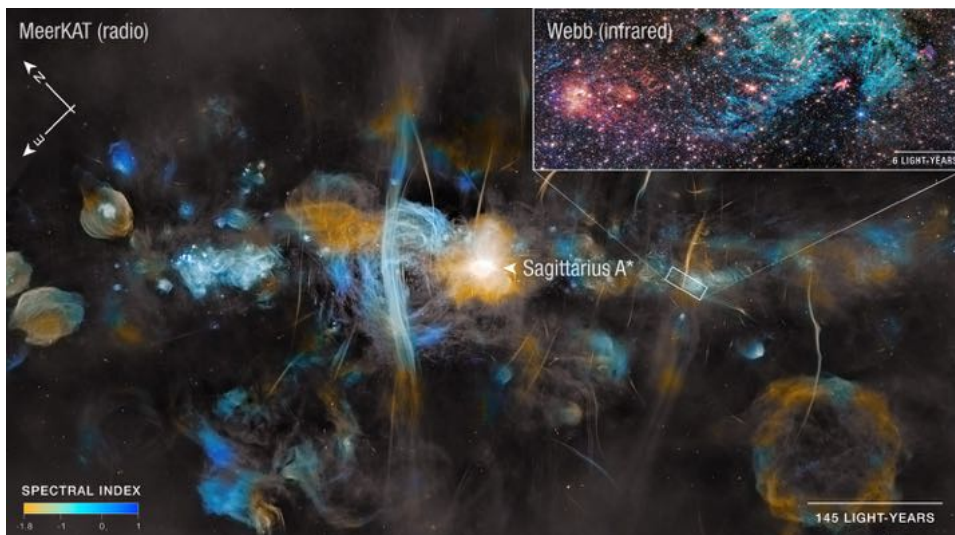


La futura misión Vigil de la ESA permitirá, por primera vez, monitorizar el Sol para obtener datos constantes y casi en tiempo real sobre la actividad solar potencialmente peligrosa. Crédito: ESA/A. Baker

ACTUALIDAD

JWST revela cómo se forman las estrellas en una de las regiones más extremas de nuestra galaxia

DOS TRABAJOS, COLIDERADOS POR EL IAA-CSIC, HAN ESTUDIADO EL CENTRO DE NUESTRA GALAXIA CON UN NIVEL DE DETALLE SIN PRECEDENTES GRACIAS A LAS OBSERVACIONES DEL TELESCOPIO ESPACIAL JAMES WEBB (JWST)



Imágenes de MeerKAT y del telescopio espacial James Webb de la región de formación estelar Sagitario C, que se encuentra a unos 200 años-luz del agujero negro supermasivo central de la Vía Láctea, Sagitario A. Las enormes estructuras filamentosas verticales de los datos de radio de MeerKAT se hacen eco de las que Webb captó a menor escala, en infrarrojo, en una nube de hidrógeno verde azulada. Créditos: NASA, ESA, CSA, STScI, SRAO, Samuel Crowe (UVA), John Bally (CU), Ruben Fedriani (IAA-CSIC), Ian Heywood (Oxford)*

El centro de nuestra galaxia es un entorno extremo donde fenómenos cósmicos intensos transforman el espacio y la materia. En una de las regiones del centro galáctico, ubicada a unos 200 años luz de Sagitario A* –el agujero negro supermasivo en el centro de la Vía Láctea– existe una enorme y densa nube de gas y polvo interestelar. A lo largo de millones de años, esa nube ha colapsado sobre sí misma, dando lugar a la formación de miles de nuevas estrellas. Esta región es conocida como Sagitario C.

Un nuevo estudio, coliderado por el IAA-CSIC, ha utilizado observaciones del JWST, construido y operado conjuntamente por la Agencia Espacial Europea, la Agencia Espacial Canadiense y la NASA, para estudiar Sagitario C con un nivel de detalle sin precedentes.

“El objetivo principal de estas observaciones era el estudio de los procesos de formación estelar de estrellas masivas, es decir, aquellas que tienen más de ocho veces la masa del sol”, apunta Rubén Fedriani, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía y supervisor principal del proyecto. “Hemos observado por primera vez en el infrarrojo los chorros asociados a dos estrellas ma-

sivas, de unas 20 veces la masa del Sol, así como más de un centenar de chorros vinculados a protoestrellas de baja masa, similares a la de nuestra estrella”.

Gracias a esta actividad de chorros o *jets*, el estudio ha descubierto, además, una nueva región de formación estelar. Este descubrimiento sugiere que la formación de estrellas en esta zona sigue procesos similares a los del resto de la galaxia, lo que demuestra que, incluso en entornos tan extremos como el centro de la Vía Láctea, pueden nacer nuevas estrellas.

Los hallazgos también podrían ayudar a resolver un persistente misterio sobre las regiones más internas de la Vía Láctea, conocidas como la Zona Molecular Central (CMZ), que abarca Sagitario C y otras regiones de formación estelar. Esta zona se caracteriza por contener grandes cantidades de gas molecular denso, lo que la convierte en una de las regiones con mayor potencial para la formación de nuevas estrellas. Sin embargo, a pesar de su alta densidad de gas, la tasa de nueva formación estelar en la CMZ es menor de lo que predicen los modelos.

CAMPOS MAGNÉTICOS: EL IMPACTO DE LA INESPERADA ESTRUCTURA DE SAGITARIO C

Los trabajos han observado evidencias de líneas de campo magnético que atraviesan Sagitario C, formando largos y brillantes filamentos de gas de hidrógeno caliente que recuerdan a fideos de espagueti. Este fenómeno podría causar la ralentización de la formación estelar en el gas circundante.

El segundo estudio analizó la apariencia inusual de Sagitario C y reveló un marcado contraste tanto con la nebulosa de Orión como con muchas otras de nuestra galaxia, que lucen en su mayoría uniformes. En esta región del centro galáctico emergen decenas de esos filamentos alargados y brillantes, algunos de varios años luz de longitud. Estas estructuras están compuestas por plasma, un gas caliente cargado de partículas.

La investigación sugiere que los campos magnéticos juegan un papel crucial tanto en el origen de las estructuras alargadas de Sagitario C como en su formación estelar. En el centro de la galaxia se encuentra Sagitario A*, un agujero negro supermasivo con una masa aproximadamente cuatro millones de veces mayor que la del Sol. El gas que gira a su alrededor estira y amplifica los campos magnéticos cercanos, los cuales, a su vez, moldean el plasma en Sagitario C.

Los científicos han sabido durante mucho tiempo que las regiones más internas de la galaxia son importantes viveros estelares. Sin embargo, algunos cálculos han sugerido que esta región debería estar produciendo muchas más estrellas jóvenes de las que se han observado. En la Zona Molecular Central, los campos magnéticos podrían ser lo suficientemente intensos como para resistir el colapso gravitacional de las nubes moleculares, limitando la tasa de formación de nuevas estrellas.

Se ha teorizado que todas las regiones de este tipo en el centro de nuestra galaxia presentan una estructura filamentosa debido a los intensos campos magnéticos del núcleo galáctico, pero esta hipótesis deberá confirmarse con futuras observaciones del JWST.

Revelado el origen de la emisión de rayos X en los chorros de agujeros negros supermasivos

EL ESTUDIO, LIDERADO POR EL IAA-CSIC, RESUELVE UN ANTIGUO ENIGMA SOBRE LAS PARTÍCULAS RESPONSABLES DE LA EMISIÓN DE RAYOS X EN LOS BLÁZARES



Impresión artística del blázar BL Lacertae. Créditos: NASA

Cuando el chorro relativista de una galaxia activa apunta directamente hacia la Tierra observamos uno de los fenómenos más extremos del universo. Así son los blázares: núcleos galácticos activos (AGN) alimentados por agujeros negros supermasivos, que expulsan chorros de materia a velocidades cercanas a la de la luz. En casos como este, uno de esos chorros se alinea casi perfectamente con nuestra línea de visión. Esta orientación amplifica su brillo —debido al efecto Doppler relativista— y provoca variaciones rápidas e intensas que se manifiestan en todo el espectro electromagnético, desde las ondas de radio hasta los rayos gamma.

En este contexto, destaca el caso de BL Lacertae, un blázar que ha ofrecido la oportunidad única para abordar una cuestión aún abierta en astrofísica: ¿cuál es el mecanismo físico que produce la emisión de rayos X en estos entornos extremos?

Un reciente estudio liderado por el IAA-CSIC ha logrado arrojar luz sobre esta incógnita. “El trabajo resuelve, por primera vez sin ningún tipo de ambigüedad, uno de los problemas más antiguos y relevantes de la astrofísica de partículas de jets relativistas de agujeros negros supermasivos”, afirma Iván Agudo, investigador del IAA-CSIC y autor principal del trabajo.

Los resultados, publicados en *The Astrophysical Journal Letters*, apuntan a que la emisión de rayos X en BL Lacertae se debe a interacciones entre electrones de alta energía y fotones —partículas de luz—, que provocan un aumento extre-

mo en la energía de estos últimos.

“Los resultados no habrían sido posibles sin el Observatorio de Sierra Nevada (OSN) y la misión espacial IXPE de la NASA y de la Agencia Espacial Italiana, diseñada específicamente para observar la radiación polarizada de rayos X proveniente de objetos astronómicos”, señala Jorge Otero, investigador del IAA-CSIC que forma parte del estudio.

EL LENGUAJE POLARIZADO DE LOS RAYOS X

La comunidad científica barajaba dos posibles mecanismos para explicar la emisión de rayos X en los blázares: uno basado en la participación de protones y otro en interacciones entre electrones y fotones. Cada uno de estos procesos deja una huella distinta en la polarización de la luz de rayos X.

Una alta polarización en rayos X apuntaría a un origen asociado a protones, mientras que una polarización más baja indicaría que los responsables son los electrones, a través de un mecanismo conocido como dispersión Compton. En este proceso, los electrones transfieren parte de su energía a los fotones, impulsándolos a frecuencias más altas, como los rayos X.

Las observaciones revelaron un bajo grado de polarización en rayos X que fue muy alto en el óptico, lo que confirma que los rayos X en BL Lacertae se originan por dispersión Compton de electrones que viajan a velocidades relativistas dentro del chorro.

UNA NUEVA MIRADA AL UNIVERSO

A finales de noviembre de 2023, el telescopio espacial IXPE observó durante siete días el blázar BL Lacertae (BL Lac), uno de los primeros de su clase en ser identificados. La campaña, coordinada con telescopios terrestres, en la que el OSN aportó la mayoría de los datos, se llevó a cabo de forma coordinada para medir la polarización en luz óptica y ondas milimétricas y de radio. Aunque IXPE ya había observado ese objeto en el pasado, esta ocasión resultó especialmente significativa: durante las observaciones de rayos X, la polarización óptica de BL Lac alcanzó un valor inusualmente alto del 47,5%, siendo la mayor jamás observada en cualquier blázar.

El grupo VHEGA del IAA-CSIC ha liderado este trabajo dentro del equipo científico de la misión IXPE. En particular, jugaron un papel clave las observaciones de polarimetría óptica llevadas a cabo desde el OSN, sin las cuales no habría sido posible alcanzar estos resultados ni verificar la altísima polarización óptica en el blázar.

Por su parte, los datos de IXPE revelaron que la emisión en rayos X presentaba una polarización significativamente menor que la de la luz óptica. El equipo no detectó una señal fuerte y determinó que la polarización en rayos X no supera el 7,4%, lo que indica que esta radiación se genera por el efecto Compton.

Este estudio subraya la importancia de combinar las observaciones en rayos X con medidas de polarización en el óptico y en longitudes de onda milimétricas, lo que permite aprovechar todo el potencial de IXPE y futuras misiones similares.

Nuevos hallazgos sobre Titán refuerzan su interés astrobiológico

EL TRABAJO, BASADO EN LOS DATOS DE TRES INSTRUMENTOS DEL TELESCOPIO ESPACIAL JAMES WEBB, OFRECE NUEVAS PERSPECTIVAS SOBRE LA QUÍMICA Y LA ATMÓSFERA DE TITÁN, LA MÁS DENSA Y ESTABLE DE TODAS LAS LUNAS DEL SISTEMA SOLAR

Al igual que la Tierra, Titán —la mayor luna de Saturno— cuenta con una atmósfera dominada por nitrógeno y fenómenos meteorológicos como nubes y lluvia. Sin embargo, a diferencia de nuestro planeta, donde el clima está gobernado por el ciclo del agua, en la criogénica Titán dicho papel lo desempeña el metano, que se evapora, forma nubes, precipita en forma de lluvia y alimenta lagos y mares en su superficie. Dicho proceso, junto con una compleja química orgánica, ha sido objeto de nuevos descubrimientos que arrojan luz sobre la fascinante atmósfera de este satélite.

Un equipo internacional, con participación del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), ha detectado por primera vez radical metilo (CH_3) en la atmósfera de Titán, una molécula compuesta por un átomo de carbono y tres de hidrógeno. “La detección directa del CH_3 nos permite validar lo que los modelos químicos llevaban tiempo prediciendo: que la rica química orgánica de Titán comienza con unos pocos radicales sumamente reactivos que ahora podemos observar”, explica Manuel López Puertas, investigador del IAA-CSIC que participa en el estudio.

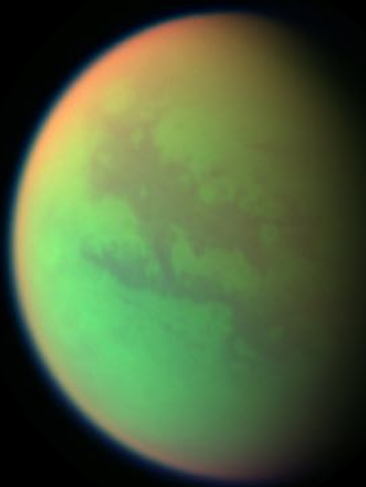
El trabajo también presenta otros resultados reveladores, como un perfil completo del monóxido de carbono (CO) en la atmósfera de Titán o los primeros indicios de convección de nubes en su hemisferio norte—donde actualmente es verano—, sobre una región rica en lagos y mares. Los resultados se han publicado en la revista *Nature Astronomy*.

LA QUÍMICA DE TITÁN

Titán, ese mundo fascinante envuelto en una bruma amarillenta y densa, es uno de los objetos de más interés astrobiológico del sistema solar. Esto se debe en gran parte a su compleja química orgánica, es decir, rica en compuestos que contienen carbono. Las mo-

léculas orgánicas son los componentes fundamentales de la vida tal y como la conocemos, por lo que estudiarlas en un entorno como Titán puede aportar claves sobre los procesos químicos que precedieron al origen de la vida en la Tierra.

El metano (CH_4) es el motor principal de la actividad química en Titán. En su atmósfera, el metano se descompone por efecto de la luz solar o por el impacto de electrones energéticos procedentes de la magnetosfera de Saturno. Estos fragmentos pueden luego reaccionar entre sí o con otras moléculas para formar compuestos más complejos, como el etano (C_2H_6) y otras moléculas orgánicas.



Composición en falso color creada con imágenes tomadas durante el sobrevuelo más cercano de la nave Cassini a Titán en 2005. Créditos: NASA/JPL/Space Science Institute

La primera detección directa del CH_3 , que se forma cuando el metano se fragmenta, ha sido posible gracias a los datos del instrumento MIRI del JWST.

Además de revelar cómo se construyen los compuestos orgánicos en la atmósfera, esta química basada en hidrocarburos tiene implicaciones importantes para la evolución de Titán a largo plazo. Cuando el metano se descompone en las capas altas de la atmósfera, parte de ese gas se transforma en otras moléculas que, con el tiempo, se depositan en la superficie en distintas formas químicas. Al mismo tiempo, parte del hidrógeno que se libera en el proceso escapa al espacio.

Como resultado, el metano se irá agotando con el tiempo, a menos que exista alguna fuente interna que lo reponga.

EL ENIGMA DEL OXÍGENO

Otro de los hallazgos más reveladores se ha logrado gracias al instrumento NIRSpec del JWST, un espectrógrafo de infrarrojo cercano con el que se ha podido medir la concentración de monóxido de carbono (CO) en la atmósfera de Titán desde la superficie hasta la alta atmósfera (sobre los 800 km de altitud). Las observaciones extienden los perfiles anteriores, limitados a 450 km, y confirman que la concentración de CO se mantiene constante en todas las capas.

Por otro lado, el CO contiene la mayor parte del oxígeno presente en la atmósfera de Titán, dominada por nitrógeno, carbono e hidrógeno, pero su origen es un misterio. Actualmente se sospecha que este oxígeno pueda proceder de flujos de $\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$ (radical hidroxilo/agua), y oxígeno atómico (O), compuestos que contienen oxígeno generado por polvo interplanetario y por la actividad de Encelado, otra de las lunas de Saturno.

Este trabajo también ha permitido medir la concentración de CO_2 mediante un modelo avanzado, confirmando medidas previas de la misión Cassini-Huygens, pero dejando sin resolver el enigma del ciclo completo del oxígeno en Titán.

Ambos hallazgos ofrecen una nueva ventana a la evolución atmosférica de Titán y a los procesos que podrían haber dado forma a entornos químicos similares al de la Tierra primitiva.

EL TIEMPO ATMOSFÉRICO

Además, combinando datos de NIRCам (JWST) con los del observatorio terrestre Keck, se detectaron nubes en latitudes medias y altas del hemisferio norte que parecían ascender con el paso de los días: es la primera vez que se observa este fenómeno en el verano de este hemisferio. Esto es especialmente relevante porque la mayoría de los lagos y mares de Titán se concentran en su hemisferio norte y la evaporación de estas masas líquidas constituye una fuente clave de metano atmosférico.

En un futuro, se espera encontrar nuevos hallazgos en los datos del JWST: su enorme precisión, así como su alta resolución espectral y sus medidas no contaminadas con la atmósfera terrestre, posiblemente permitan descubrir nuevos compuestos minoritarios en la atmósfera de este satélite.

La formación de planetas puede enmascarar las propiedades reales de sus estrellas

EL IAA-CSIC COLIDERA UN ESTUDIO QUE EXPLORA LA CONEXIÓN ENTRE LA PRESENCIA DE UN PLANETA ALREDEDOR DE UNA ESTRELLA Y LAS PROPIEDADES DE ESTA

Según los datos del archivo de exoplanetas de la NASA, hasta la fecha se han confirmado más de 5.800 exoplanetas. De ellos, apenas un 5 % orbita estrellas con masas solares intermedias. Esta escasa proporción podría deberse, en gran medida, a las dificultades que plantea la detección de planetas alrededor de este tipo de estrellas. Cuando las estrellas son de baja masa —similares o inferiores al Sol—, su menor tamaño y brillo favorecen la detección de planetas mediante técnicas como la del tránsito, que identifica un leve descenso en el brillo estelar cuando un planeta pasa por delante de la estrella desde nuestro punto de vista. Sin embargo, en el caso de las estrellas de masa intermedia, más grandes y luminosas, este tipo de señales planetarias son mucho más difíciles de detectar.

Con el objetivo de entender mejor la relación entre las propiedades de estas estrellas y la presencia de planetas, un estudio recientemente publicado en la revista *Astronomy & Astrophysics* ha analizado una muestra de 131 estrellas de masa intermedia en distintas etapas de su evolución. “A pesar de la complejidad de las estrellas intermedias, hemos logrado inferir correlaciones entre la presencia de planetas y la metalicidad de sus estrellas”, explica Giovanni Mirouh, investigador del IAA-CSIC y segundo autor del trabajo.

LAS CLAVES DE UNA RELACIÓN DINÁMICA

En las estrellas de baja masa, se ha establecido una correlación positiva entre su metalicidad y la presencia de planetas. Los planetas se forman más fácilmente en discos alrededor de estrellas con mayor metalicidad, ya que estos discos contienen más de los elementos que componen los planetas.

Al analizar la muestra de estrellas de masa intermedia, el equipo científico identificó una correlación similar, aunque con matices significativos. En las estrellas intermedias más evolucionadas, la relación entre metalicidad y presencia de planetas sigue siendo positiva, como ocurre con las estrellas de baja masa. Sin embargo, en las estrellas jóvenes de masa intermedia, el patrón se invierte: se observa una mayor presencia de planetas en torno a estrellas con menor metalicidad. Este resultado inesperado podría estar relacionado con la evolución de la composición superficial de esas estrellas en sus diferentes etapas.

Para explicar este fenómeno, desde el IAA-CSIC se calcularon los modelos estelares específicos para el rango de masas considerado, con el objetivo de evaluar las propiedades de mezcla en la superficie estelar.

EL PAPEL DE LOS PLANETAS EN LA COMPOSICIÓN SUPERFICIAL DE LAS ESTRELLAS

Durante la formación de una estrella, esta se encuentra rodeada por un disco de gas y polvo conocido como disco protoplanetario, que proporciona el material necesario para su desarrollo. A medida que los planetas se forman, “roban” una parte significativa de los elementos pesados presentes en el disco. El material restante, más pobre en metales, cae hacia la estrella central en un proceso denominado acreción. Como resultado, la estrella termina incorporando un gas con menor contenido de metales que el que originalmente conformaba el disco protoplanetario.

En estrellas de baja masa, debido a que poseen zonas convectivas en sus capas externas, este material menos metálico se mezcla rápidamente en toda la estrella, siendo casi imperceptible. No obstante, en estrellas jóvenes de mayor masa, las capas externas son inicialmente radiativas, lo que limita la mezcla del material. Esto provoca que el gas pobre en metales permanezca en la superficie y, si se mide su composición en ese momento, parecerá que la estrella tiene menos metales de lo que realmente tiene. Con el tiempo, estas estrellas más masivas desarrollan zonas convectivas en sus capas externas, permitiendo que el material superficial se mezcle con el interior y revelando la verdadera composición metálica de la estrella.

Este hallazgo confirma que la formación de planetas puede enmascarar temporalmente las verdaderas propiedades de su estrella, y subraya la necesidad de tener en cuenta la evolución estelar al estudiar sistemas planetarios.

Para avanzar en la comprensión del vínculo entre la presencia de planetas y la metalicidad en estrellas de masa intermedia, será necesario ampliar el número de sistemas conocidos y caracterizar con mayor precisión las propiedades de sus estrellas.



Impresión artística de un disco protoplanetario con planetas en formación que redistribuyen el gas y el polvo a su alrededor. Crédito NSF/AUI/NSF NRAO/S.Dagnello

Detectan un misterioso objeto cósmico que emite señales de radio y rayos X de manera sincronizada

EL ESTUDIO, QUE CUENTA CON LA PARTICIPACIÓN DEL IAA-CSIC, HA DETECTADO POR PRIMERA VEZ LA EMISIÓN DE RAYOS X EN UNA FUENTE TRANSITORIA EN RADIO DE LARGO PERÍODO

Un faro en el espacio que se enciende durante dos minutos —con una luz tan potente que desafía lo que sabemos— y luego permanece apagado durante más de cuarenta, repitiendo este patrón una y otra vez, es una buena metáfora para describir el comportamiento de los objetos transitorios de radio de largo período (LPT). Estos objetos astronómicos, cuya naturaleza es un misterio, emiten breves pulsos de ondas de radio con intervalos regulares que pueden durar minutos u horas.

Un estudio, publicado en la revista *Nature*, ha descubierto un misterioso objeto cósmico, llamado ASKAP J1832-0911, un LPT que emite señales de radio y rayos X de manera sincronizada cada 44 minutos. “Es la primera vez que se detecta emisión de rayos X en un objeto de este tipo, y lo más sorprendente es que su comportamiento no se parece a nada conocido en nuestra galaxia: es extremadamente brillante, varía mucho en intensidad y no encaja en las categorías tradicionales”, afirma Miguel A. Pérez-Torres, investigador del IAA-CSIC que forma parte del trabajo.

El equipo internacional descubrió ASKAP J1832-0911 con el radiotelescopio ASKAP, ubicado en Wajarri (Australia) y operado por CSIRO, la agencia nacional de ciencia del país. Las señales de radio se correlacionaron con pulsos de rayos X detectados por el Observatorio Chandra de la NASA, que casualmente observaba la misma región del cielo.

OBJETOS CÓSMICOS QUE DESAFÍAN LAS TEORÍAS ACTUALES

Los objetos transitorios de radio de largo período (LPT) representan una categoría recientemente identificada de objetos astronómicos. Desde su descubrimiento en 2022, se han detectado apenas una decena de LPT en todo el cielo.

Actualmente, no existe una explicación clara sobre qué causa estas señales ni

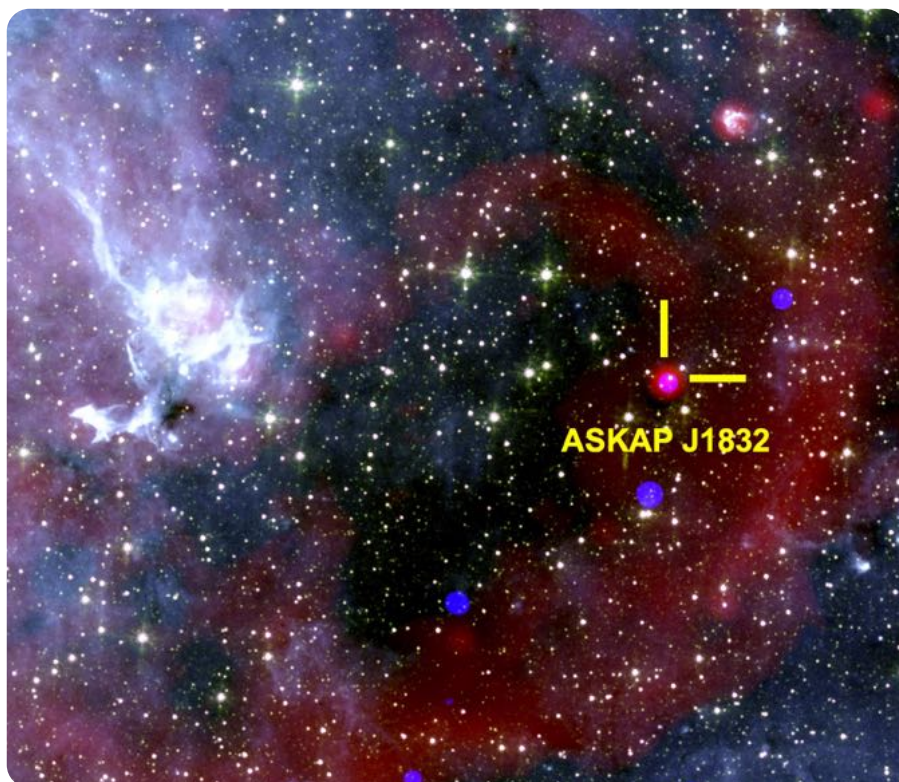


Imagen del cielo que muestra la región alrededor de ASKAP J1832-0911. Rayos X del Observatorio de Rayos X Chandra de la NASA, datos de radio del radiotelescopio sudafricano MeerKAT y datos infrarrojos del Telescopio Espacial Spitzer de la NASA. Créditos: Ziteng (Andy) Wang, ICRAR.

por qué se “encienden” y “apagan” en intervalos tan largos, regulares e inusuales. Detectarlas tanto en rayos X como en ondas de radio podría ayudar a identificar más casos y avanzar en su comprensión.

Según la profesora Nanda Rea (ICE-CSIC e IEEC), segunda autora del estudio, “encontrar uno de estos objetos apunta a la existencia de muchos más. El descubrimiento de su emisión transitoria en rayos X abre nuevas perspectivas sobre su misteriosa naturaleza”.

“Lo que también fue realmente destacable es que este estudio muestra un increíble esfuerzo de trabajo en equipo, con contribuciones de investigadores de todo el mundo con conocimientos diferentes y complementarios”, añade Rea.

Este hallazgo también permite acotar las posibles explicaciones sobre qué tipo de objeto podría ser. Dado que los rayos X tienen una energía mucho mayor que las ondas de radio, cualquier teoría debe explicar ambos tipos de emisión, lo que proporciona una pista clave en un enigma aún sin resolver.

“El objeto es miles de veces más luminoso de lo que cabría esperar por su rotación, lo que obliga a replantear algunos modelos físicos”, señala Miguel A. Pérez-Torres (IAA-CSIC). “Podría tratarse de un magnetar envejecido —una estrella de neutrones con un campo magnético extremadamente intenso— o de una enana blanca supermagnetizada. Ambas opciones desafían las teorías actuales”, concluye.

Observaciones en el infrarrojo revelan dos familias de galaxias activas



Representación artística de un núcleo galáctico activo (AGN). Créditos: ESO/M. Kornmesser

Los núcleos galácticos activos (AGN) son zonas situadas en el centro de ciertas galaxias donde un agujero negro supermasivo libera una enorme cantidad de energía al absorber la materia que lo rodea. Estos núcleos pueden influir en la evolución de galaxias completas gracias a su capacidad para arrastrar elementos químicos y generar potentes vientos que afectan el entorno galáctico. Además, son puntuales y están ocultos tras densas nubes de polvo, lo que dificulta su estudio directo.

“El rango infrarrojo es especialmente útil porque es capaz de penetrar en las nubes de polvo que cubren muchos de estos fenómenos y revela transiciones energéticas que corresponden a iones solo presentes cuando el campo de radiación es muy intenso, sustituyendo a la detección directa en rayos X o en el ultravioleta”, explica Enrique Pérez Montero, investigador del IAA-CSIC y responsable del estudio.

El estudio —publicado en la revista *Astronomy & Astrophysics* y liderado por el IAA-CSIC, en colaboración con el CEFA— revela que los núcleos activos de galaxias, considerados hasta ahora un grupo homogéneo, en realidad se dividen en dos tipos bien diferenciados cuando se analizan en el infrarrojo. Esto sugiere que los agujeros negros que los alimentan podrían pasar por distintas fases de evolución energética.

BAJO LA LUPA INFRARROJA

El estudio describe cómo se pueden investigar fenómenos extremadamente violentos que tienen lugar en galaxias situadas a millones de años luz gracias a las huellas que dejan en el gas que las rodea. Este gas actúa como una especie de mensajero: absorbe la radiación más energética —que no podemos de-

LA INVESTIGACIÓN, LIDERADA POR EL IAA-CSIC, SE CENTRA EN EL USO DEL RANGO INFRARROJO PARA ESTUDIAR LOS NÚCLEOS ACTIVOS DE GALAXIAS, CONSIDERADOS ENTRE LOS OBJETOS MÁS ENERGÉTICOS DEL UNIVERSO

tectar directamente— y la vuelve a emitir en longitudes de onda más accesibles, como el infrarrojo o la luz visible. De este modo, los científicos pueden reconstruir lo que ocurre en el corazón de estas galaxias, sin necesidad de “verlo” directamente, lo que resulta clave para entender cómo han evolucionado a lo largo del tiempo.

Aunque el rango infrarrojo cercano y medio, que es invisible para el ojo humano, resulta clave para estudiar el interior de las galaxias activas, también presenta una gran dificultad: gran parte de esta radiación no logra atravesar la atmósfera terrestre, ya que es absorbida por el vapor de agua y otras moléculas. Por eso, hasta la llegada de telescopios espaciales como el James Webb, esta información no ha podido ser usada de manera exhaustiva para explorar qué fenómenos acontecen en el interior de estas galaxias.

El IAA-CSIC ha desarrollado una nueva técnica para analizar la radiación que emiten los AGN. Esta se basa en el uso de determinadas líneas del infrarrojo que, no solo son capaces de atravesar las densas nubes de polvo, sino que, además, permite estudiar las transiciones más energéticas que tienen lugar en su entorno.

Gracias a este método, el equipo ha descubierto que los núcleos galácticos activos se agrupan en dos familias bien diferenciadas: una emite un espectro ionizante más duro, pero resulta menos eficiente, mientras que la otra muestra un espectro más suave y luminoso. Ambos grupos presentan poblaciones muy similares y, según el equipo investigador, podrían representar dos fases evolutivas distintas entre las que la transición ocurre con relativa rapidez, como demuestra la escasez de galaxias con características intermedias.

Según Juan Antonio Fernández Ontiveros, investigador del CEFA y coautor del estudio, los núcleos activos de galaxias podrían comportarse de forma similar a ciertos sistemas de estrellas conocidos como binarias de rayos X, en los que una de las estrellas es un agujero negro.

En la fase menos brillante, el disco de material que rodea al agujero negro está más alejado y genera una nube de electrones muy energéticos, que puede incluso producir un chorro de partículas a gran velocidad. En la fase más brillante, el disco se acerca al agujero negro, aumenta su intensidad luminosa, pero emite menos radiación de alta energía.



Los agujeros negros supermasivos en galaxias activas muestran estados de acreción similares a los observados en los agujeros negros de masa estelar en nuestra galaxia. Crédito: Teo Muñoz Darias/Juan A. Fernández Ontiveros

CUANDO EL UNIVERSO SE ESCUCHA

Enrique Pérez Montero estudia los mecanismos de emisión de energía producidos por eventos de formación estelar masiva y por núcleos activos de galaxias, así como su interacción con el medio interestelar, desde la más completa oscuridad. Padece una enfermedad degenerativa de la retina, denominada retinosis pigmentaria, que no le ha impedido continuar su carrera investigadora en el IAA-CSIC.

Como parte de las adaptaciones necesarias para facilitar su trabajo, y también con el objetivo de explorar nuevas formas de hacer accesible la información científica, el coautor del estudio, Juan Antonio Fernández, programó una sonificación. Esta herramienta permite escuchar cómo varía la emisión de una estrella binaria de rayos X y revela patrones que, según el estudio, podrían estar presentes también en los AGN, aunque a una escala mucho mayor.

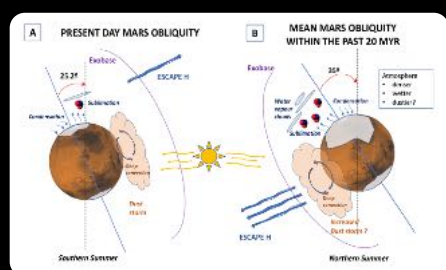
ACTUALIDAD

Nuevas claves para entender la pérdida del agua que albergó Marte

EL ESTUDIO, LIDERADO POR EL IAA-CSIC, ANALIZA EL PAPEL DE LA INCLINACIÓN DEL EJE DE ROTACIÓN DEL PLANETA ROJO EN LA PÉRDIDA DE SU AGUA

Marte es hoy un planeta extremadamente árido, cuyas condiciones de presión y temperatura impiden que el agua líquida exista en su superficie. Sin embargo, los indicios geológicos y mineralógicos apuntan a que, en un pasado remoto, el planeta rojo albergó grandes volúmenes de agua en forma de ríos, lagos e incluso océanos. A pesar de décadas de investigación, aún no se ha resuelto una de las grandes incógnitas sobre la historia marciana: ¿qué ocurrió con toda esa agua?

Un nuevo estudio, liderado por el IAA-CSIC y publicado recientemente en la revista científica *Nature Astronomy*, ha analizado el papel de la oblicuidad —la inclinación del eje de rotación del planeta— en la pérdida de hidrógeno y, por tanto, de agua, en la atmósfera de Marte a lo largo del tiempo.



Esquema que muestra los procesos que han conducido a una mayor pérdida de H en los últimos 20 millones de años (Myr). No se espera que la tasa de pérdida haya sido constante en el tiempo, si no que puede variar significativamente durante la historia marciana. Créditos - Imagen de Marte: NASA/JPL/USGS | Figura: Gilli, G., González-Galindo, F., Chaufray, JY. et al. Increased hydrogen escape from Mars atmosphere during periods of high obliquity. Nat Astron (2025)

“Para comprender el estudio hay que tener en cuenta que la oblicuidad de Marte ha cambiado mucho a lo largo de su historia”, advierte Gabriella Gilli, investigadora del IAA-CSIC que colidera el trabajo. Y añade: “El modelo climático tridimensional que hemos utilizado sugiere que, durante periodos de alta oblicui-

dad, la tasa de escape pudo ser hasta cerca de veinte veces superior a la actual”.

Francisco González-Galindo, investigador del IAA-CSIC y coautor principal del estudio, señala: “Si reuniéramos toda el agua presente en Marte hace entre 3 y 4 mil millones de años, obtendríamos un océano global de más de cien metros de profundidad”.

¿A DÓNDE HA IDO A PARAR EL AGUA MARCIANA?

Parte de esa agua podría seguir presente hoy bajo la superficie, atrapada en forma de hielo o integrada en minerales hidratados. Sin embargo, otra fracción se ha perdido en el espacio a través de un proceso conocido como escape atmosférico, en el que átomos y moléculas adquieren la energía suficiente para superar la atracción gravitatoria del planeta y escapar al medio interplanetario. No obstante, la tasa actual de escape de hidrógeno no es suficiente para explicar, por sí sola, la pérdida de la enorme cantidad de agua que existió en el pasado.

La órbita de Marte experimenta variaciones periódicas que influyen de forma significativa en su clima. Una de las más relevantes es el cambio en la inclinación de su eje de rotación, conocida como oblicuidad. Aunque actualmente este valor es parecido al de la Tierra, en Marte ha oscilado ampliamente a lo largo de los últimos cientos de millones de años.

El estudio ha revelado que durante los periodos en los que la inclinación del eje alcanzaba valores elevados, aumentaba la insolación en los polos. Esto intensificaba el ciclo del agua y generaba una atmósfera más cálida y húmeda. En esas condiciones, el vapor de agua alcanzaba capas más altas de la atmósfera, donde era más vulnerable a la radiación solar, que lo descomponía en átomos de hidrógeno y oxígeno. Al ser muy ligeros, los átomos de hidrógeno podían escapar con mayor facilidad

Imagen de Marte tomada por el instrumento OSIRIS a bordo de la nave Rosetta (ESA) en 2007. Crédito: ESA & MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/RSSD/INTA/UPM/DASP/IDA

al espacio, contribuyendo así a la pérdida de agua del planeta.

El equipo investigador estima que la pérdida de hidrógeno durante periodos de alta oblicuidad podría explicar la desaparición de una cantidad de agua equivalente a un océano global de unos 80 metros de profundidad.

SIMULANDO EL PASADO CLIMÁTICO DE MARTE

Para este estudio, el IAA-CSIC ha incorporado mejoras fundamentales en el modelo climático global de Marte (Mars-PCM) desarrollado inicialmente por el *Laboratoire de Météorologie Dynamique* de París, incluyendo nuevos compuestos y reacciones químicas que han permitido, por primera vez, reproducir con precisión las observaciones del escape de hidrógeno realizadas, entre otras, por las misiones MAVEN (NASA) y Mars Express (ESA).

Asimismo, el equipo ha llevado a cabo las simulaciones que muestran cómo los cambios en la inclinación del eje marciano han influido en la pérdida de agua al espacio.

IMPLICACIONES ASTROBIOLÓGICAS Y CLIMÁTICAS

En este contexto, el estudio tiene implicaciones astrobiológicas, ya que comprender cómo los cambios en la inclinación del eje del planeta han intensificado el ciclo del agua y favorecido su pérdida al espacio permite afinar la búsqueda de posibles periodos en los que Marte pudo haber sido habitable.

Además, el trabajo también pone de relieve hasta qué punto los parámetros orbitales pueden transformar el clima de un planeta. Mientras que en la Tierra las variaciones son suaves gracias a la estabilización que ejerce la Luna, en Marte han provocado cambios drásticos que afectaron al agua, la atmósfera y, en última instancia, a su potencial para sostener vida.

Una señal cósmica del universo primitivo ayudará a desvelar cómo eran las primeras estrellas

EL TRABAJO, CON PARTICIPACIÓN DEL IAA-CSIC, EL ESTUDIO, DEMUESTRA QUE SERÁ POSIBLE CONOCER LA MASA DE LAS PRIMERAS ESTRELLAS FORMADAS TRAS EL BIG BANG

Comprender cómo el universo pasó de la oscuridad a la luz con la formación de las primeras estrellas y galaxias, el periodo conocido como Amanecer Cósmico, constituye un punto de inflexión clave en su evolución. Sin embargo, ni siquiera los telescopios más potentes pueden observar directamente estas primeras estrellas, por lo que determinar sus propiedades sigue siendo uno de los mayores desafíos de la astronomía.

Ahora, un equipo científico internacional, en el que participa el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), ha demostrado que será posible conocer la masa de las primeras estrellas. “Dado que estos cuerpos celestes se formaron hace más de 13.000 millones de años, ya han completado su evolución y no pueden observarse de forma directa. Por ese motivo, en este trabajo utilizamos una señal indirecta para estudiar la distribución de masas de esas primeras estrellas: la línea de 21 centímetros”, afirma Giovanni Mirouh, investigador del IAA-CSIC que participa en el estudio.

La línea de 21 cm es una señal muy tenue, pero detectable desde la Tierra, que contiene información valiosa sobre cómo era el universo en épocas muy tempranas. Al analizar cómo las primeras estrellas y sus remanentes influyeron en esa señal, el equipo investigador ha demostrado que los radiotelescopios del futuro nos permitirán entender mejor el universo primitivo y cómo pasó de ser una masa casi homogénea de hidrógeno a la complejidad que observamos hoy. Los resultados se han publicado en la revista *Nature Astronomy*.

¿RECONSTRUIR EL PASADO ESTELAR?

Este estudio tenía como objetivo descifrar cómo eran las primeras estrellas del universo. Para ello, se han simulado diferentes poblaciones estelares, es decir, grupos de estrellas con distintas características iniciales, como su masa, incluyendo también sistemas binarios, donde dos estrellas orbitan una alrededor de la otra.

En algunos de estos sistemas, una de las estrellas puede acabar su vida convirtiéndose en un agujero negro o en una estrella de neutrones, y comenzar a absorber material de su compañera. Este proceso genera rayos X muy energéticos, que pueden afectar al hidrógeno interestelar ionizándolo, es decir, alterando sus átomos. Ese hidrógeno, a su vez, emite la señal conocida como la línea de 21 cm, que puede verse modificada por la radiación. “Lo más interesante es que los rayos X modifican esa señal y, por eso, al estudiar cómo ha cambiado, podemos obtener pistas sobre cómo eran esas estrellas primigenias”, explica Mirouh.

El IAA-CSIC ha contribuido a este trabajo a través de la participación de Giovanni Mirouh, cuyo trabajo ha consistido en proporcionar los modelos de estrellas sin metales —formadas solo por hidrógeno y helio— que sirven de base para las simulaciones de poblaciones estelares. Estos modelos abarcan un amplio rango de masas, de hasta 1000 veces la masa del Sol.

Además, Mirouh ha participado en el desarrollo del código de poblaciones estelares, permitiendo que los parámetros de las estrellas se obtengan directamente de los modelos físicos en lugar de recurrir a fórmulas antiguas, poco adecuadas para este tipo de

objetos.

Otro aspecto importante de este estudio ha sido el análisis del potencial de instrumentos como REACH y SKAO para detectar las variaciones en la señal, lo que permitiría reconstruir cómo eran las primeras estrellas. “La buena noticia es que sí: los resultados muestran que con suficientes horas de observación, o con la sensibilidad adecuada, podríamos distinguir entre distintos escenarios, e incluso hacerlo mejor si combinamos los datos de ambos instrumentos”, señala Mirouh.

REACH Y SKAO: DESENTAÑANDO EL UNIVERSO PRIMITIVO

REACH es una antena de radio diseñada para captar la débil señal de 21 cm del hidrógeno primitivo. Aunque aún se encuentra en fase de calibración, se espera que pueda aportar datos clave sobre el Amanecer Cósmico y la Época de la Reionización, cuando las primeras estrellas alteraron la estructura del hidrógeno en el universo.

Por su parte, SKAO, cuya coordinación española está liderada por el IAA-CSIC, será el mayor radiotelescopio del mundo, formado por miles de antenas distribuidas en Sudáfrica y Australia. Permitirá mapear con gran precisión las fluctuaciones de la línea de 21 cm en enormes regiones del cielo y, por tanto, estudiar en detalle cómo evolucionaron las primeras estructuras del universo.

Ambos proyectos son fundamentales para investigar las masas, luminosidades y distribución de las primeras estrellas. Y, aunque estos instrumentos no podrán observar estrellas individuales, sí proporcionarán información sobre poblaciones completas, sistemas binarios de rayos X y galaxias.



Impresión artística que muestra un campo de estrellas de Población III, compuestas solo por hidrógeno y helio (sin metales), tal y como habrían aparecido apenas 100 millones de años después del Big Bang. Crédito: NOIRLab/NSF/AURA/J. da Silva/Spaceengine/M. Zamani

Zeitgeist, motor de coincidencias, ¿freno de la creatividad plena?

POR ENRIQUE PÉREZ MONTERO (IAA-CSIC)

Ando desde hace una temporada obsesionado con el concepto de Zeitgeist y su influencia en la sociedad y, más particularmente, en la ciencia. Se trata de un término poco amistoso para el hablante español porque viene del alemán. Significa literalmente "El espíritu de los tiempos", siendo "Zeit" el tiempo y "Geist", el espíritu. Se utiliza esta palabra, al parecer, porque fue el célebre escritor alemán Goethe el que introdujo por vez primera el concepto a principios del siglo XIX.

De una manera más precisa, el Zeitgeist se define como todo aquello que flota en el ambiente de la sociedad, la cultura, la educación o la ética de un lugar y una época determinados. Este espíritu colectivo y compartido de manera involuntaria supone una influencia directa en nuestra manera de pensar, de razonar, de admitir algo como bello o admisible, de decidir sin reflexionar demasiado lo que es importante para la sociedad o el individuo, pero que proviene sobre todo de nuestro entorno más próximo o de nuestra herencia cultural directa. Es básicamente lo que provoca que no admitamos como tolerables ciertos cánones estéticos, actitudes o prioridades vitales, cuando hace solo unas décadas los mismos no suponían un problema para casi nadie.

Probablemente, nuestra época sea el momento de la historia, al menos hasta ahora, en que más claramente se puede percibir cómo evoluciona este espíritu, gracias a la rapidez con la que actualmente se transmiten la información y las opiniones, en contraste con otras épocas en las que el pensamiento más común solo llegaba a imponerse tras décadas de lenta absorción, primero por parte de una clase intelectual minoritaria y dominante, y, más tarde, por el resto de la población. De la misma manera, es bastante probable que la propia evolución de este espíritu de los tiempos provoque que nuestra sociedad actual sea irremediabilmente condenada y mirada con rechazo por unas generaciones venideras que, con total seguridad, dispondrán de valores y conocimientos muy distintos a los actuales.

El Zeitgeist no tiene una entidad física o espiritual definida, al menos que se sepa, sino que es un concepto abstracto que sirve para identificar una cierta manera de pensar, percibir y valorar todo lo que nos rodea en un contexto social determinado. Por supuesto, esta no es una opinión unánime y no faltan aquellos que defienden que el Zeitgeist sí tiene una entidad real que impregna el pensamiento de todos los individuos, aunque esto no deja de ser una elucubración y no se han encontrado nunca evidencias de una posible conexión real entre individuos que los ponga en la misma fase mental.

Por poner un ejemplo de esto, el psicólogo Karl Jung ya hablaba de pensamiento inconsciente colectivo, el cual representa elementos

comunes de la experiencia humana. De este modo introduce el concepto de sincronicidad, que alude a la aparición simultánea de eventos significativos en distintas culturas sin una relación causal evidente.

En ese mismo sentido, hay algunas corrientes esotéricas que han tratado de ofrecer una explicación a este fenómeno, como la existencia de una especie de archivo ubicuo, llamado registro akásico, donde se almacenarían todas las experiencias humanas, y de todo el Universo, y al que algunos iniciados o iluminados podrían acceder para documentarse, o, incluso, en el ámbito de la astrología, se usa el término de sincronicidad, empujada por la influencia común de los astros en los actos y el pensamiento coincidente de los humanos.

De forma algo más rigurosa, también son de destacar los trabajos del biólogo Rupert Sheldrake, que defiende la existencia de un campo morfogenético, algo invisible que organiza la estructura y el comportamiento de los sistemas biológicos y sociales.

Todas estas son propuestas interesantes, pero incapaces de cruzar el umbral de la admisión científica porque ninguna ha podido ser demostrada a través del método científico con alguna clase de experimento o medición reproducible. Por el contrario, estas teorías sólo están basadas en la creencia o la experiencia personal, siendo, por consiguiente, difíciles de ser aceptables por una mayoría de la comunidad científica o de dar lugar a una predicción o aplicación reales, más allá de la pura especulación.

En cualquier caso, el concepto de Zeitgeist tiene mucha relevancia en el contexto de la ciencia por motivos diversos. En primer lugar, han sido siempre notables las coincidencias temporales de ciertos hallazgos y descubrimientos por parte de personas o grupos que no estaban en contacto entre sí y que, por tanto, no tenían conocimiento de que alguien estuviera trabajando simultáneamente en las mismas ideas que ellos trataban de desarrollar, y sin que hubiera prueba alguna de plagio.

Entre las controversias más destacables acerca de la originalidad de un descubrimiento científico podemos citar la que enfrentó en la segunda mitad del siglo XVII a Isaac Newton y a Gottfried Leibniz con el desarrollo del cálculo diferencial.



Retratos de Isaac Newton (izquierda) y Gottfried Leibniz (derecha). Créditos: Science Museum | Christoph Bernhard Francke

Es curiosa la coincidencia de que Newton reconociera que muchos de sus hallazgos científicos eran debidos a que disponía de la ventaja de muchos siglos de descubrimientos previos por parte de generaciones pasadas de otros científicos. Es decir, que su mirada llegaba más lejos porque estaba, según él, a hombros de gigantes. Sin duda, Leibniz descansaba sobre los mismos hombros y, por tanto, disponía de una perspectiva similar para llegar a conclusiones parecidas.

No es el único caso y, de hecho, los hay a centenares, empezando de nuevo por Newton, cuya ley de la gravitación se adelantó a trabajos que en aquella época hacía sobre el mismo tema el holandés Christian Huygens. Por ceñirnos únicamente a la astronomía, también son notables la coincidencia sobre la predicción de la existencia del planeta Neptuno, hecha al mismo tiempo por el francés Le Verrier y el inglés Adams en 1846.

Menos de un siglo después, en la década de 1920, el Big Bang fue postulado de manera independiente por el belga George Lemaître y el estadounidense Edwin Hubble. Durante varias décadas, la ley que relaciona la velocidad de expansión de las galaxias y la distancia a la que se encuentran, relación que resulta en la evidencia de que todo el Universo estuvo concentrado en cierto momento en un solo punto, fue conocida de manera exclusiva como ley de Hubble, pero el reconocimiento tácito de que Lemaître fue, de hecho, el primero, ha permitido re-bautizar la ley con el nombre de ambos científicos.

A veces la motivación de que grupos independientes lleguen a descubrimientos similares sin estar en contacto tiene una causa clara en el hecho de que una tecnología nueva y más precisa se muestre disponible a la vez para aquellos que tengan acceso a ella. Es llamativo el invento del telescopio en 1608, que se atribuye principalmente a Galileo Galilei, pero del cual se sabe que apareció hasta en otros cinco sitios diferentes en Europa de manera simultánea. De tal modo la atribución al primer ser humano que observó las manchas del Sol o los cráteres de la Luna es un mérito compartido y hasta concurrido, difícil de aclarar exactamente a quién pertenece.

Otro ejemplo es la astronomía de radio, cuyo auge se produjo tras la Segunda Guerra Mundial, por motivos principalmente bélicos, propiciando la aparición de multitud de tecnología de captación de estas señales y provocando, a su vez, la coincidencia en el descubrimiento de algunas fuentes de radio en el cielo. Por ejemplo, los quasars, galaxias muy lejanas y brillantes en la banda de radio, fueron reportados primero por parte del holandés Schmidt en la década de 1960, muy poco tiempo antes de que un equipo liderado por Cyril Hazard los descubriera de manera independiente en Australia.

Algo parecido ocurrió con la detección del



Interpretación artística del Big Bang. Créditos: NASA's Goddard Space Flight Center/CI Lab

fondo cósmico de microondas, los púlsares, los agujeros negros súpermasivos, la detección de exoplanetas o los estallidos de rayos gamma. En todos estos casos, los hitos fueron resultado de auténticas carreras cuyo pistoletazo de salida vino marcado por la disponibilidad de aparatos de medida antes de cuya existencia no podían hacerse estos descubrimientos.

No obstante, las coincidencias en los descubrimientos científicos, especialmente en campos como la astronomía, pueden atribuirse a otros factores, no necesariamente debidos a avances previos o tecnológicos compartidos, conduciendo a que múltiples equipos lleguen a descubrimientos similares en un período de tiempo relativamente corto. Entre las posibles causas alternativas también puede influir el acceso a teorías o modelos bien establecidos y aceptados, lo cual puede hacer que varios investigadores puedan trabajar de manera independiente para aplicar estas teorías a nuevas observaciones o fenómenos. Esto puede desembocar en descubrimientos simultáneos que respaldan y amplían las teorías existentes.

Hoy en día, además, las conferencias y colaboraciones científicas, en las que los científicos a menudo comparten sus ideas, hallazgos y datos, amén de la presión competitiva, son mucho más frecuentes, llevando a que la convergencia en la investigación y el descubrimiento simultáneo de fenómenos astronómicos se dé con asiduidad. Es decir, si interpretamos que todos estos factores forman parte del clima cultural e intelectual predominante en una determinada época histórica, compuesto de las ideas, creencias, valores y tendencias que caracterizan a una sociedad en un momento dado, concluiremos necesariamente que el Zeitgeist es una pieza fundamental que moldea el ritmo y la dirección de los avances científicos.

Es muy relevante en este contexto la apor-

tación del psicólogo norteamericano Edwin Boring, quien en la década de 1950 estudió el papel del Zeitgeist en la manera en que progresa, o no, el avance científico. Boring defendía que el Zeitgeist puede tanto ayudar como obstaculizar el progreso científico, influyendo en las motivaciones, las creencias y las actitudes de los científicos, mostrando que en ciertas ocasiones el Zeitgeist ha afectado la aceptación de teorías científicas, desde la resistencia inicial a ideas innovadoras hasta la eventual adopción de nuevas perspectivas.

Boring argumentaba que la lealtad a las ideas establecidas puede dificultar la aceptación de nuevos descubrimientos, y cómo los prejuicios y las actitudes egoístas pueden influir en la comunicación y la colaboración científica. Si esto es así, la autoobservación en la ciencia puede ser problemática debido a la naturaleza subjetiva de la percepción, pero, por otro lado, se debería dar más importancia a la comunicación abierta y el cuestionamiento continuo en el avance científico, contribuyendo a un equilibrio entre el garantismo de las viejas teorías ampliamente aceptadas y la libertad para explorar los límites de las viejas normas, único medio para expandir el conocimiento.

En estas condiciones, la difusión casi inmediata de los resultados y la globalización que disfrutamos hoy en día, que ayudan a la uniformidad, también limitan de manera preocupante la creatividad y la permisibilidad en los objetos de estudio de muchos proyectos científicos. La falta de diversidad en los enfoques también conduce a una homogeneidad en la manera de razonar, diseñar teorías o realizar experimentos que no redundan precisamente en la ruptura de fronteras del conocimiento, sino más bien en todo lo contrario.

Sabemos que la diversidad de metodologías, campos de trabajo o la composición de los grupos de investigación fomenta la riqueza interpretativa, pero el Zeitgeist puede su-

poner un freno a esta tendencia, sobre todo si los grupos de investigación beben siempre de las mismas fuentes, usan los mismos equipos y están cortados por los mismos patrones, así como también si los canales de financiación van dirigidos siempre a proyectos similares. La atención a enfoques diferentes, y eso incluye también los aspectos culturales, lingüísticos o formativos, pueden llevar a rutas de avance totalmente inesperadas.

La irrupción de las inteligencias artificiales también puede suponer un obstáculo, sobre todo si estas son entrenadas o usadas con los mismos datos, aunque, por otro lado, es posible que lleguen por sí mismas a conclusiones también inesperadas a través de rutas misteriosas que compartan, o quizá no, con la humanidad. En ese caso, quedaremos posiblemente liberados para siempre del Zeitgeist en ciencia, siguiendo un camino que ya no quedaría dictado por lo que nos hace humanos de una determinada época y con unos determinados valores éticos y estéticos, sino siguiendo una nueva senda regida por designios que quizá ya nunca comprenderemos.

Me atrevo a decir que, en esas condiciones, será muy improbable que vuelva a haber nunca más una coincidencia en un descubrimiento científico, llevándonos a nuevos espacios de conocimiento no condicionados por los límites de nuestras circunstancias históricas. Por otro lado, esto no tiene tampoco por qué ser así, si somos capaces de sacar provecho del uso de una nueva perspectiva ofrecida por las inteligencias artificiales sin renunciar a nuestra propia humanidad y a todo lo que nos hace ser seres sociales que comparten los valores de nuestro lugar y de nuestro tiempo, es decir, del Zeitgeist. Entonces nuestro condicionamiento social puede ser una ventaja para interpretar los nuevos enfoques, dotándolos de un contexto eminentemente humano y no un lastre que nos lleve siempre a las mismas conclusiones.

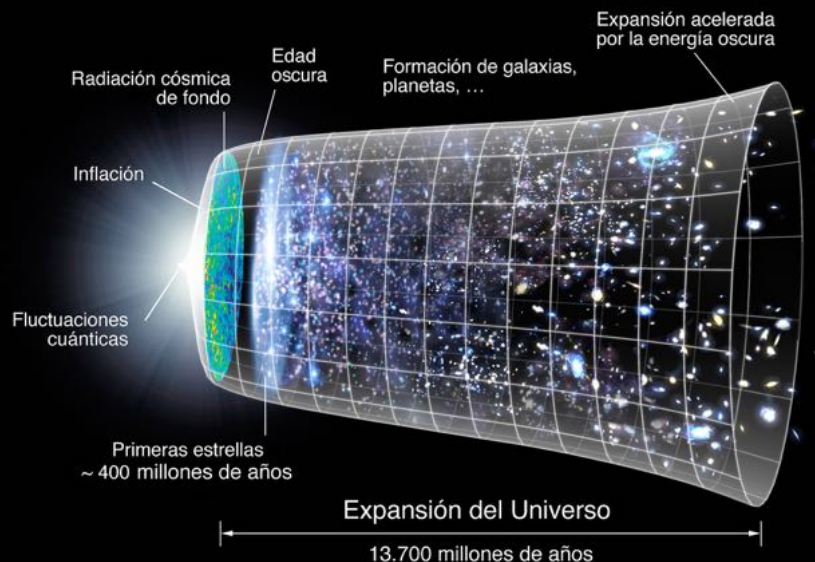
¿A qué ritmo se expande el universo?

El gran conflicto de la cosmología moderna

Estamos en las primeras décadas del siglo XX, y los astrónomos estadounidenses Edwin Hubble y Vesto Slipher se disponían a realizar observaciones de galaxias próximas para medir por primera vez características tan relevantes como su velocidad o a qué distancia se encontraban de nosotros.

Lo que encontraron sigue siendo uno de los hallazgos observacionales más importantes de la historia de la astronomía: prácticamente, todas las galaxias se estaban alejando de nosotros, y no sólo eso, vieron que la velocidad a la que se alejaban era mayor mientras más lejos se encontraban de nosotros.

Este descubrimiento, respaldado por los cálculos teóricos de George Lemaître, condujo a una clara y directa conclusión: el universo se expande.



Representación gráfica de la evolución del universo desde sus comienzos a la actualidad.
Crédito: NASA, Ryan Kaldari. Adaptación a español: Luis Fernández García

PILARES

¿CÓMO DE RÁPIDO SE EXPANDE EL UNIVERSO?

Para responder a esto primero tenemos que entender bien cómo estos astrónomos fueron capaces de deducir la velocidad y la distancia de las galaxias. En realidad, medir la velocidad es la parte fácil, ya que la luz de las galaxias sufre de un “Efecto Doppler” al alejarse de nosotros. Al igual que pasa con el sonido de una ambulancia cuando se aleja y escuchamos su sirena más aguda, la luz que es emitida por objetos muy lejanos que se distancian de nosotros la observamos más roja, es decir, su espectro visible se ha desplazado a longitudes de onda más rojas. Esto lo llamamos “desplazamiento al rojo” o “redshift”, y medir dicho desplazamiento es conocer automáticamente la velocidad a la que se aleja la galaxia.

Por otro lado, conocer la distancia es un desafío mucho mayor, ya que no basta con observar su posición en el cielo. Para ello, uno de los métodos más eficaces es el de las “Candelas Estándar”, es decir, objetos que tienen una luminosidad conocida. Al saber la luz que emite y poder medir la luz que nos llega después de haber sido dispersada al recorrer la larga distancia que separa dicho objeto de nosotros, podemos calcular la distancia que ha recorrido la luz, y por ende, la distancia a la que está dicho objeto. Un ejemplo de Candelas Estándar son las estrellas variables Cefeidas; si se observa una Cefeida en una galaxia, sabemos a la distancia a la que está la galaxia que la hospeda.

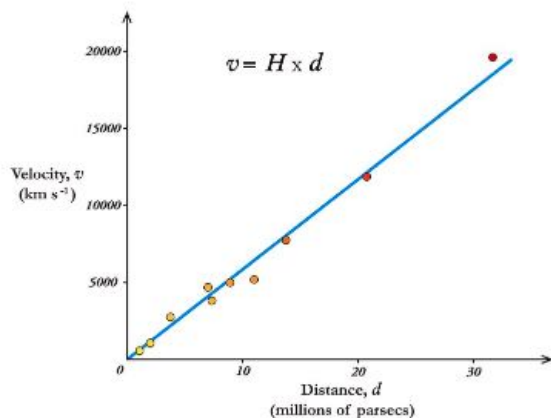
Mediante estos dos conceptos, Hubble, junto con las mediciones de Slipher, encontró una relación lineal entre velocidad de recesión (v) y distancia (d), relación que se conoce actualmente como Ley de Hubble-Lemaître, y la constante de proporcionalidad que las une es conocida como constante de Hubble (H_0).

El valor de H_0 medido con este método (método directo) ha cambiado mucho conforme se han mejorado las observaciones, arrojando actualmente un valor de $H_0 = 74 \text{ km/s/kpc}$. Esto significa que una galaxia ubicada a 1 kiloparsec (kpc) de nosotros (unos 3,3 millones de años luz) la vamos a ver alejarse de nosotros a una velocidad de 74 kilómetros por segundo.

¿EXISTEN OTRAS FORMAS DE MEDIR H_0 ?

Además del método directo, también se puede estimar H_0 de forma indirecta a partir de los modelos cosmológicos, que explican de qué está hecho el universo y cómo ha evolucionado con el tiempo a partir de los datos recolectados por satélites (como, por ejemplo, Planck, de la Agencia Espacial Europea) que observaron la luz más antigua del universo, la radiación de fondo de microondas (CMB).

Del CMB se obtienen diversos parámetros con los que se ajustan los modelos cosmológicos actuales, siendo el que mejores predicciones ha hecho hasta el momento el modelo Λ -CDM, que consta de una constante cosmológica (Λ) y materia oscura fría (CDM). De estos modelos se deduce, indirectamente, cómo ha variado la expansión del universo con el tiempo y cuál es el valor actual de H_0 , que se estima en $H_0 = 67 \text{ km/s/kpc}$.



Gráfica de la Ley de Hubble-Lemaître. Distancia (en kpc) vs. velocidad de recesión de las galaxias (en km/s). Credits: Sciencephotogallery.com

SE PONE TENSA LA COSA

Se puede ver que hay una discrepancia entre el valor de la constante de Hubble medido de forma directa (74 km/s/kpc) y el que se deduce de forma indirecta a partir del CMB y el modelo Λ -CDM (67 km/s/kpc). Esto hace décadas no supuso ningún problema, ya que los valores no son tan distintos y las incertidumbres asociadas a las medidas (del orden del 5-10%) permitían que ambos valores conviviesen dentro de sus respectivos márgenes de error.

Con el paso de los años, sin embargo, se ha mejorado sustancialmente la precisión en la medida de distancias de las galaxias, así como en la determinación de los parámetros cosmológicos, reduciendo el error de ambas medidas y dando como resultado, en lugar de una convergencia entre ambos valores, una divergencia a dos valores distintos medidos cada uno con mucha precisión. Esta discrepancia se conoce como Tensión de Hubble y es uno de los mayores problemas en cosmología que existen hasta el momento.

¿Y SI SE EQUIVOCAN LOS OBSERVACIONALES?

Una forma de atajar este problema es planteándose la posibilidad de que estemos midiendo mal las distancias a las galaxias. Quizás a distancias muy cercanas estamos estimando mal la velocidad de recesión ya que, a nivel local, hay muchas interferencias gravitatorias con galaxias vecinas. O quizás tenemos que buscar mejores indicadores de distancias como nuevas candelas estándar o alternativas a éstas como las ondas gravitacionales.

No obstante, a día de hoy, en 2025, grandes colaboraciones como SH0ES, usando las observaciones de supernovas tipo Ia con los mejores datos del telescopio espacial James Webb, siguen arrojando un valor de 74 km/s/kpc.

¿Y SI SE EQUIVOCAN LOS TEÓRICOS?

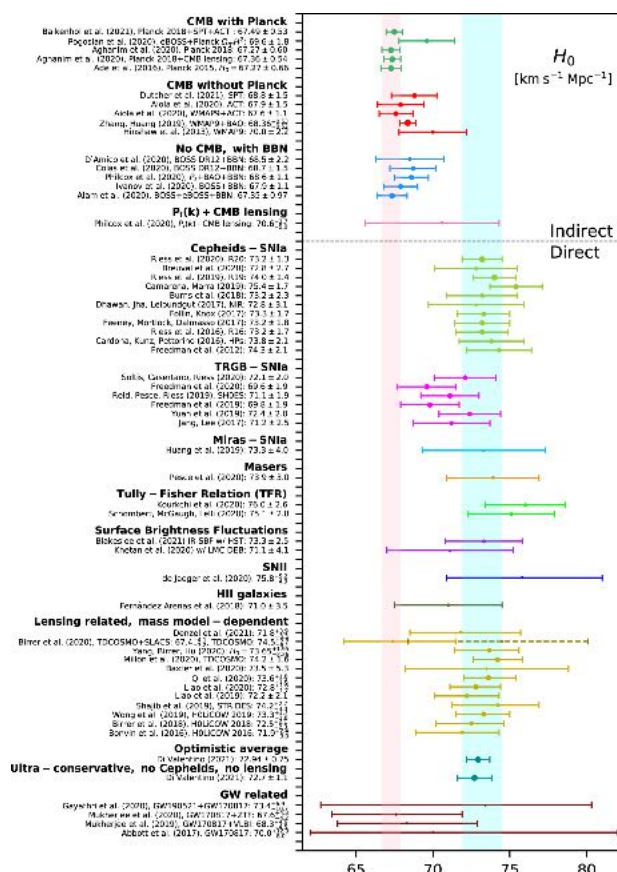
Otra posibilidad es que estemos realizando demasiadas suposiciones sobre las condiciones iniciales del plasma ancestral medido del CMB y que realmente la física que ocurría en las épocas iniciales del universo fuese muy distinta.

Sin embargo, el modelo Λ -CDM tiene pocos competidores y, aunque se han intentado modificar todos los parámetros posibles para testar nuevos modelos, las predicciones que Λ -CDM otorga son las más robustas hasta la fecha, habiendo sido capaz de reproducir desde las estructuras a gran escala observadas en el universo como la cantidad de Helio y Litio primordial que se formó en el Big Bang.

¿Y SI SE EQUIVOCA TODO EL MUNDO?

Esta es una pregunta que en ciencia siempre nos podemos plantear y este conflicto no es político, sino científico. Ambos enfoques pueden tener sus errores y ambas vertientes, tanto la observacional como la teórica, están peleando no por ver quién tiene razón, sino por ver dónde está el problema. Quizás estamos malinterpretando y calibrando mal la luz que medimos de candelas estándar como supernovas Ia, quizás existieron otro tipo de interacciones en el plasma primordial que nos hacen suponer mal las condiciones que dieron lugar al CMB o, a lo mejor, estamos suponiendo mal la curvatura intrínseca del espacio-tiempo o midiendo mal parámetros importantes para los modelos como la densidad de materia oscura o energía oscura. O, quizás, tengamos que reinventarlo todo.

Múltiples alternativas a todo se están planteando fervientemente mientras el lector finaliza este artículo, y quizás mañana salga un nuevo *paper* planteando una alternativa al modelo Λ -CDM o encontrando una nueva calibración de distancias cosmológicas, pero, sea cuál sea la solución, sin duda nos hará experimentar una de las mayores revoluciones de la historia de la astronomía moderna.



Medidas directas e indirectas de H_0 obtenidos por diferentes estudios. Créditos: di Valentino, Eleonora; et al. (2021) "In the realm of the Hubble tension—a review of solutions"

PEQUEÑAS MIRADAS

DE NADA

POR SEBASTIANO DE FRANCISCIS (IAA-CSIC)

Paris, principio del siglo XII

La cuestión que más intrigaba a Boron, un clérigo de Montbéliard, era la de la existencia del vacío, sobre la cual se consideraba más sabio que cualquier otro filósofo. [...]

—Pero ¿por qué —lo interrumpía Baudolino— te interesa tanto demostrar que el vacío no existe?, ¿qué te importa a tí el vacío?

—Importa, importa. Porque el vacío puede ser o bien intersticial, es decir, hallarse entre cuerpo y cuerpo en nuestro mundo sublunar, o bien, extenso, más allá del universo que vemos, cerrado por la gran esfera de los cuerpos celestes.

Granada, 2022

Mercedes desayuna con su hijo Eneko.

“Hijo tienes que tomar una decisión: ¿de qué quieres hacer el trabajo de experto?”

“De La Nada...” Eneko contestó aún bostezando, otra mañana más, antes de ir con toda prisa a su curso de 1º de primaria del CEIP Federico García Lorca de Granada.

“Eneko, pero tienes que hacer el trabajo, no puedes no hacer nada. ¡Un tema que te guste, anda! Luego, como ha dicho el maestro, te ayudaré a consultar a un profesional y a preparar una presentación para tus amigos. No me seas vago...”

Eneko está empezando a leer un poco y a escribir, pero su imaginación, con seis años, ya viaja lejos, hasta los horizontes del mundo-universo, del conocimiento posible.

“No no, mamá, yo quiero de verdad trabajar sobre La Nada (el concepto). De todo sé algo, pero de la nada no. A poco que me ponga a pensar en eso, en eso de La Nada, me cuesta mucho... ¡no sé nada de La Nada!”

“Ah...” les contestó la madre, pensando ‘¿y ahora QUÉ?’. Unos días después Mercedes contacta con dos instituciones de expertos en la búsqueda e investigación sobre La Nada.

El primer instituto trabaja en lo espiritual: “Estimado Director de Departamento de Teología, de la Universidad Loyola de Granada, me pongo en contacto con usted por...” [click, send mail]



Eneko junto a Javier Pascual en la entrada del Instituto de Astrofísica de Andalucía

El segundo, en lo material: “Buenos días Javier, soy Mercedes, del grupo de familias del cole, mi hijo quiere estudiar La Nada... ¿podemos contactar con algún profesional de astrofísica?”

Javier Pascual, jefe del Grupo de Variabilidad Estelar (GVE), en el Departamento de Física Estelar, y padre de la mejor amiga de Eneko, se convirtió entonces en el primer contacto de Eneko con el IAA. “Lo primero que me saltó a la mente hablando de La Nada son los agujeros negros, entonces me puse en contacto con Carlos Barceló” comenta Javier. “Luego, queriendo ir más allá de ese tema teórico, cómo La Nada está conectada con el concepto de vacío, contacté también con Miguel Abril.” Fue así que Eneko cruzó las puertas del Instituto de Astrofísica de Andalucía y habló con algunos de sus investigadores e ingenieros, con una pregunta, siempre la misma: “¿qué es La Nada?”

Nicetas, el historiador bizantino, dijo una vez que “una puerta no es una puerta si no tiene un edificio a su alrededor, de otro modo sería solo un agujero, qué digo, ni siquiera eso, porque un vacío sin un lleno que lo rodea no es ni siquiera un vacío.”

El vacío - decía Boron- no existe porque la naturaleza le tiene horror. Es evidente, por razones filosóficas, que no existe, porque si existiera, o sería sustancia o sería accidente. Sustancia material no es, porque, si no, sería cuerpo y ocuparía espacio; y no es sustancia incorpórea porque, si no, como los ángeles, sería inteligente. No es accidente, porque los accidentes existen solo como atributos de sustancias. En segundo lugar, el vacío no existe por razones físicas: toma un vaso cilíndrico...

Es sencillo, le había dicho Ardzrouni, noble armenio interesado por las ciencias - el agua de la jofaina se convierte en vapor y va a ocupar la esfera, el vapor huye de la esfera haciéndola girar; cuando la esfera se va a parar, señal de que dentro ya no tiene más vapor, se cierran los pitorros. Y entonces, ¿qué queda en la jofaina y en la esfera? Nada, es decir, el vacío.

—Para verlo deberías abrir la esfera, y entonces entraría aire enseguida. Aun así, hay un lugar donde podrías estar y advertir la presencia del vacío. Pero lo notarías poco tiempo porque, faltando el aire, morirías sofocado.

Ardzrouni le hacía notar a Boron que estaba confundiendo el vacío universal, sobre el que se podría discutir, con el vacío que se crea en los intersticios entre corpúsculo y corpúsculo. Y al preguntarle Boron qué eran estos corpúsculos, su opositor le recordaba que [...] Todo el universo, todo lo que está en él, y nosotros mismos, estamos compuestos por corpús-

Después de mucho meditar, con un póster y una presentación a los compañeros del cole, Eneko pudo sintetizar su idea sobre la nada: un centímetro cúbico de vacío cósmico, replicado en Tierra con la 'máquina de la nada', tiene mil millones de moléculas (¡un numerón de 10 dígitos!). Eso parece mucho, pero en un mismo centímetro cúbico de aire hay un mogollón de moléculas, muchísimas, unas tropecientas, más de millones de millones de millones (27 trillones, es decir, $2,7 \times 10^{19}$, ¡un numeraco de 20 dígitos!).

En definitiva, jóvenes mentes inquietas con preguntas nada fáciles.

[illegible]

29

DESTACADOS

CONTAR LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA DE COSTA A COSTA



Hasta hace poco, la luz artificial se percibía exclusivamente como un símbolo de progreso y bienestar. Sin embargo, en los últimos años se ha empezado a reconocer su otra cara: la contaminación lumínica, un tipo de contaminación ambiental silenciosa pero cada vez más preocupante. A diferencia de otros contaminantes ampliamente conocidos, como los gases de efecto invernadero o los residuos tóxicos, la luz artificial nocturna se había librado del escrutinio público por sus aparentes beneficios. Hoy sabemos que su uso excesivo y mal dirigido no solo afecta gravemente a la observación astronómica, sino que también tiene un impacto directo en la salud humana, altera los ritmos biológicos y desestabiliza los ecosistemas. La contaminación lumínica se perfila así como uno de los desafíos ambientales emergentes del siglo XXI.

Con motivo del Día Mundial del Medio Ambiente, que se celebra cada 5 de junio desde 1972, el CSIC, a través del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), coordinó un evento de divulgación científica centrado en la contaminación lumínica y su impacto ambiental y social. Bajo el título ‘Contar la contaminación lumínica de costa a costa’ la iniciativa ofreció 21 charlas divulgativas impartidas por profesionales en 19 ciudades españolas, de forma simultánea, con el objetivo de sensibilizar a la ciudadanía sobre esta problemática.

Al reunir a centros de investigación, asociaciones de astrónomos amateurs y otras entidades comprometidas, esta acción —que busca acercar la problemática de la contaminación lumínica a la ciudadanía desde una perspectiva científica y accesible— refuerza una red de colaboración orientada a promover soluciones reales y sostenibles frente a esta amenaza ambiental creciente.

UN LIBRO CON MOTIVO DEL 50 ANIVERSARIO DEL IAA-CSIC

Contar medio siglo de historia no es tarea sencilla. Pero ese fue precisamente el propósito —y el logro— del libro conmemorativo del 50 aniversario del IAA-CSIC presentado en la 43ª Feria del Libro de Granada. El acto fue conducido por Alba Fernández Barral, responsable de comunicación, divulgación y educación del observatorio CTAO, y giró en torno a una conversación con el director del IAA-CSIC, Antxon Alberdi. Alberdi destacó el talento de Silbia López de Lacalle —artista, diseñadora, escritora y periodista científica—, autora principal de la obra, a quien agradeció de forma especial su “brillantez” y su esfuerzo sostenido y descomunal por sacar adelante este proyecto. Intervinieron, además, el ‘exmutante’ Nani Castañeda, y algunos de los coautores del libro. El libro ha sido diseñado y maquetado por Colectivo Verbena y contará con una edición publicada por la editorial CSIC, cuyo respaldo otorga al proyecto un alto nivel de compromiso. Antes de finalizar, Alberdi agradeció a las más de 250 personas que forman parte del instituto “por haber hecho del centro lo que es hoy y por su contribución apasionada a la ciencia”.

El IAA-CSIC es participante recurrente en la Feria del Libro. Desde hace ocho años, junto a la Estación Experimental del Zaidín (EEZ-CSIC), organiza el Área de Ciencia de la feria, que este año contó con más de 40 actividades. En sintonía con la temática de esta edición de la Feria del Libro de Granada, centrada en el lema “Mujeres, literaturas”, se desarrolló un programa con una destacada participación de divulgadoras de primer nivel. El broche final lo puso una sesión dedicada a repasar los 70 años de historia de la EEZ-CSIC y los 50 del IAA-CSIC, y las diversas iniciativas conjuntas de cultura científica promovidas por ambos centros de investigación granadinos.



III PREMIOS DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y CIENCIA CIUDADANA



El CSIC ha premiado dos iniciativas del IAA entre las ganadoras de sus III Premios de Divulgación Científica y Ciencia Ciudadana. Los premios fueron entregados el día 16 de junio en las IV Jornadas de Cultura Científica y Ciencia Ciudadana del CSIC 2025, en la sede del CSIC en Madrid. Las dos iniciativas premiadas del IAA-CSIC han sido:

- **Primer premio en la modalidad Obra Unitaria para el cortometraje ‘¡Movimiento, teatro, SgrA*... y telón!’, ideado y dirigido por Sara Cazzoli (IAA-CSIC).** Es una infografía humana original e innovadora que escenifica el concepto científico del baile de las estrellas alrededor del agujero negro en el centro de nuestra Vía Láctea: SgrA*.

- **Accésit en la modalidad Proyecto de Divulgación para la serie de televisión ‘Territorio gravedad’, creada y dirigida por Carlos Barceló (IAA-CSIC) y Nacho Chueca.** Es una docu-ficción que utiliza la gravedad como elemento vertebrador y que supone la mayor panorámica audiovisual sobre el cosmos realizada en idioma español.

¡Muchas felicidades por este reconocimiento!

HORIZONTES DE LUZ, UN PROYECTO ENTRE LA ASTROFÍSICA Y EL ARTE



Horizonte: límite visual de la superficie terrestre. Por definición, no podemos ver más allá del horizonte. Pero el cerebro humano no concibe que algo sea inalcanzable. Buena parte de la historia del arte ha sido la de intentar buscar la luz más allá del horizonte. Y también la de la ciencia, especialmente la de las estrellas.

En esta webserie de cinco capítulos exploramos el intento del ser humano por atravesar algunos horizontes gracias a la exploración espacial y a la ciencia del cosmos más puntera y actual, pero también a través de la música, el cine o la pintura. Porque el horizonte es también un espacio de encuentro entre la tierra y el cielo. Entre el arte y la ciencia.

Un proyecto para conmemorar el cincuenta aniversario del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), con la colaboración de FECYT:

Disponible en: horizontes.iaa.csic.es y nuestro canal de YouTube





HASTA SIEMPRE, ÁNGEL

La madrugada del 22 de junio, nos dejó Ángel Rolland.

Ángel Rolland Quintanilla fue uno de los fundadores del Instituto de Astrofísica de Andalucía, que este año está celebrando su quincuagésimo aniversario. Junto a José María Quintana González, Eduardo Battaner López y Pilar López de Coca y Castañer, su querida esposa y compañera, formaron los pilares sobre los que se construyó el IAA. Formaban un cuarteto muy unido por una amistad anclada en un proyecto profesional ilusionante. Hasta hace unos años aún estaba en su despacho discutiendo sobre la variabilidad estelar y sobre cualquier otra de las múltiples cosas que le interesaban y motivaban.



Ángel Rolland (primero por la derecha) junto al resto del equipo fundador del IAA-CSIC: Victor Costa, Pilar López de Coca, Eduardo Battaner y José María Quintana

Estudió Física en la Universidad Complutense de Madrid, donde fue Profesor Ayudante en el curso 65/66. Posteriormente se traslada a Puerto Rico para dar clases en la universidad como profesor de matemáticas y físicas hasta el año 1968. Finalmente, viaja a Granada, incorporándose al grupo de jóvenes físicos asociados al Observatorio de Cartuja, liderado por Teodoro Vives.

En 1971 se trasladó al *Royal Greenwich Observatory* (RGO), donde colaboró en el estudio de cúmulos globulares, publicando su primer artículo en 1972 con la filiación RGO. Su estancia en Greenwich fue muy fructífera para el futuro IAA, estableciéndose una colaboración con algunos miembros del observatorio inglés que llevó a la instalación y montaje del fotómetro ubicado en el Observatorio del Mohón del Trigo en Sierra Nevada. El primer artículo del IAA lleva su firma, junto a la de Pilar y dos colaboradores del RGO, en una *Research Note* de la revista *Astronomy & Astrophysics* en 1976.



Ángel Rolland (en el centro) en una sus innumerables subidas al observatorio de Observatorio del Mohón del Trigo



Ángel Rolland junto a su mujer, Pilar López de Coca

Fue profesor y tutor de la primera hornada de estudiantes de doctorado que se incorporaron al IAA y que eligieron el estudio de la variabilidad estelar, frente a los que optaron por el estudio de la atmósfera terrestre, que eran las dos líneas de investigación con las que había comenzado el centro su andadura.

Ángel nos enseñó a disfrutar de la ciencia y de la vida. Las estancias en el Observatorio del Mohón del Trigo eran una escuela de astronomía observacional, pero, sobre todo, de cómo enfrentar las dificultades con buen ánimo y humor. Sus estudiantes y compañeros tenían un refugio seguro, amable y gastronómicamente inigualable en su casa, donde él ejercía algunas veces como excelso cocinero para platos muy singulares.



Ángel (en el centro de la foto, con camisa de cuadros) junto a varios compañeros y compañeras de profesión

Durante estos cincuenta años, su presencia en el IAA era una señal de que las cosas iban bien. Su apoyo al desarrollo de este no fue solo científico: en los primeros momentos tuvo que fajarse en la consolidación de nuestro centro como un instituto de investigación del CSIC. Y, posteriormente, su disponibilidad para cualquier tarea que fuera en beneficio del instituto era un ejemplo para todos.

Ángel fue un hombre tranquilo y valiente que enfrentó muchas circunstancias adversas en su vida y siempre salió con una entereza ejemplar. Era capaz de transmitirnos a los que le rodeábamos una sensación de confianza en el futuro. Bastaba hacer bien tu trabajo y gritar al mundo ¡hip!, ¡hip! cuando levantaba su copa de vino.

Por Emilio Alfaro (IAA-CSIC), compañero y amigo



INSTITUTO DE
ASTROFÍSICA DE
ANDALUCÍA



EXCELENCIA
SEVERO
OCHOA



CSIC



Instituto de Astrofísica de Andalucía
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Excelencia Severo Ochoa



@iaa_csic



@iaa.comunicación



@iaacsic.bsky.social



@iaaudc