




SEA

Sociedad Española de Astronomía



**Portada: Imagen de Euclid
del cúmulo de galaxias de Perseo.**
Créditos: ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA.

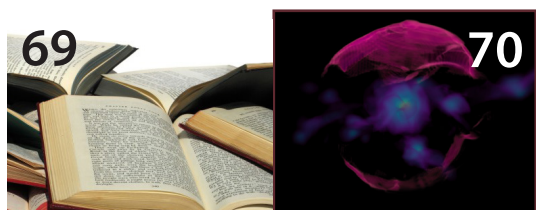
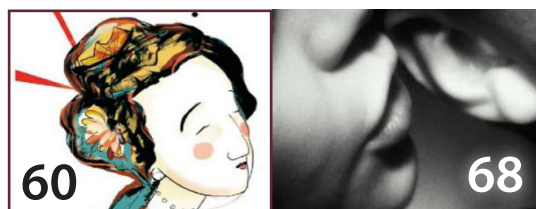
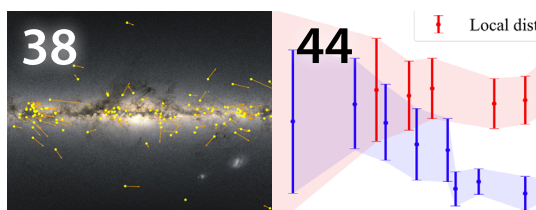
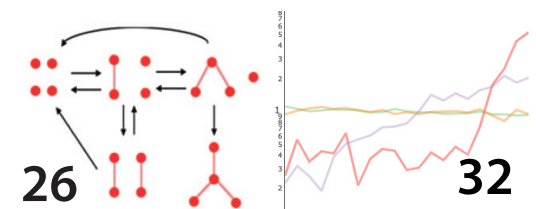
Comité editorial:
Josefa Becerra González
Nuria Huélamo
José María Diego
Marc Ribó
Adriana de Lorenzo-Cáceres Rodríguez
Fernando J. Ballesteros Roselló
Amelia Ortiz Gil

Maquetación:
Fernando J. Ballesteros Roselló

ISSN:1575-3476

Sociedad Española de Astronomía SEA
www.sea-astronomia.es
Comisión de Información
comi-info@sea.am.ub.es

CONTENIDOS



- 5 Editorial
- 6 Planificación y procesado de las imágenes de diseminación temprana en Euclid
- 14 Observaciones Tempranas con Euclid: Investigando la Componente Subestelar
- 20 Explorando galaxias en vacíos cósmicos: CAVITY y su primera distribución pública de datos (DR1)
- 26 OPENS: Tras los ladrillos de la vida en el espacio
- 32 IA en astronomía
- 38 En busca y captura de las estrellas fugitivas de la Galaxia
- 44 Tensiones cosmológicas: sorpresas más allá del modelo cosmológico estándar
- 48 Espacio_3: la ciencia es arte, y el arte es ciencia
- 56 El silencio de la luna: música y palabra bajo el cielo chino
- 60 Curso sobre género y ciencia. Información y recursos para la igualdad
- 68 Ecos de (la) Sociedad
- 69 Libros
- 70 Tesis doctorales

Imagen de Euclid de la galaxia IC 342, difícil de observar en general por estar detrás del polvo del disco de la Vía Láctea. Aquí está observada con el instrumento de infrarrojo cercano, tras una hora de exposición, en longitudes de onda de 0,7, 1,1 y 1,7 micras para los canales RGB, respectivamente. Crédito: ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA.





EDITORIAL

Este nuevo número del boletín lo abren dos artículos centrados en las esperadas primeras imágenes de la misión espacial Euclid. En primer lugar, se presenta la planificación y procesado de estas primeras imágenes de diseminación temprana y, en particular se presenta el caso científico de regiones de formación estelar cercanas. También se presenta la primera distribución pública de datos del proyecto CAVITY, centrado en el estudio de galaxias localizadas en vacíos cósmicos.

Nos introducimos en el proyecto ERC OPENS, explorando los procesos de formación y destrucción de material prebiótico en el medio interestelar. Una breve reseña sobre el impacto de la IA en astronomía, cada vez más importante dada la ingente cantidad de datos que la nueva instrumentación trae consigo. Se presenta uno de los trabajos galardonados por La Vanguardia de la Ciencia 2024, centrado en la búsqueda de estrellas fugitivas con Gaia. Se discuten algunas de las tensiones cosmológicas dentro del marco del modelo cosmológico estándar.

Se presentan en este número dos proyectos que aúnan la ciencia y el arte. En particular, Espacio3 nace como un espacio compartido de ciencia y artes escénicas con un marcado carácter experiencial y único. Así también, el espectáculo El silencio de la Luna, donde ciencia, música y poesía se dan la mano para rescatar atisbos de la cultura China. Por último, se presenta un resumen del curso de género y ciencia organizado por la comisión Mujer y Astronomía que ha sido todo un éxito y está disponible online.

Además de estos temas, encontrarán como siempre las secciones de Ecos de (la) Sociedad, la reseña de un libro y los resúmenes de las tesis doctorales.

¡Feliz solsticio!

Pepa Becerra González
Instituto de Astrofísica de Canarias
Universidad de La Laguna

PLANIFICACIÓN Y PROCESADO DE LAS IMÁGENES

La misión Euclid, lanzada en julio del 2023, implementó en su fase de verificación un programa de imágenes de diseminación temprana (ERO) para mostrar al público y a la comunidad su potencial divulgador y científico. Se realizó tras una petición de propuestas, ofreciendo hasta 24 horas de tiempo de observación. Este artículo describe los retos asociados a su planificación en una fase temprana de la misión, así como el procesado de sus imágenes.



Guillermo Buenadicha
Guillermo.Buenadicha@esa.int

Ralf Kohley
Ralf.Kohley@esa.int

Roland Vavrek
Roland.Vavrek@esa.int

Centro Europeo de Astronomía Espacial
(ESAC), Agencia Espacial Europea (ESA)

LA MISIÓN

Euclid, de la Agencia Espacial Europea (ESA), es una misión de clase media que forma parte del programa científico Cosmic Vision. Su objetivo es explorar el Universo oscuro, para inferir su evolución y composición. Creará un mapa de la estructura a gran escala del Universo a lo largo del espacio y tiempo observando miles de millones de galaxias hasta una profundidad de 10 000 millones de años luz, mapeando aproximadamente un tercio del cielo. Euclid explorará cómo el Universo se ha expandido y cómo se han formado sus estructuras a lo largo de la historia cósmica, desvelando más información sobre la gravedad y el papel jugado por la energía y la materia oscura a base de inferencias sobre la materia bariónica observada. Se le ha apodado por ello el «detective cósmico».

Además de ese objetivo principal, se espera que el inmenso catálogo de galaxias, así como la alta precisión de las imágenes de sus casi 40 000 campos observados permitirán una ciencia adicional de enorme relevancia. La misión está participada por la NASA, que aporta los detectores infrarrojos en uno de los dos instrumentos científicos, y por un importante consorcio científico de Euclid, con más de 2000 miembros de más de 300 instituciones en 17 países de tres continentes, que aportó en la fase de construcción los instrumentos científicos y contribuye también con el segmento de procesado de datos en tierra. El volumen de datos de Euclid, que alcanzará más de 30 PB a fin de misión, es uno de los principales retos tecnológicos de la misma.

La misión lleva embarcados dos instrumentos: VIS, una cámara óptica de alta resolución (más de 600 millones de píxeles) y NISP, un espectrómetro y fotómetro en infrarrojo. Completan la carga de pago un telescopio Korsch de 1,2 metros de espejo primario que permite tomar imágenes de un campo amplio (0,49 grados cuadrados) alcanzando objetos hasta la magnitud 26. Otro de los retos tecnológicos de Euclid es el sistema de apuntado, que le permiten mantener la imagen con una alta precisión (menos de 25 milisegundos de arco a lo largo de 10 minutos) para poder así caracterizar con alta exactitud la forma de las galaxias en el campo. La misión principal o escaneado rutinario consiste en la repetición de una secuencia de observación de unos 70 minutos

DE DISEMINACIÓN TEMPRANA EN EUCLID

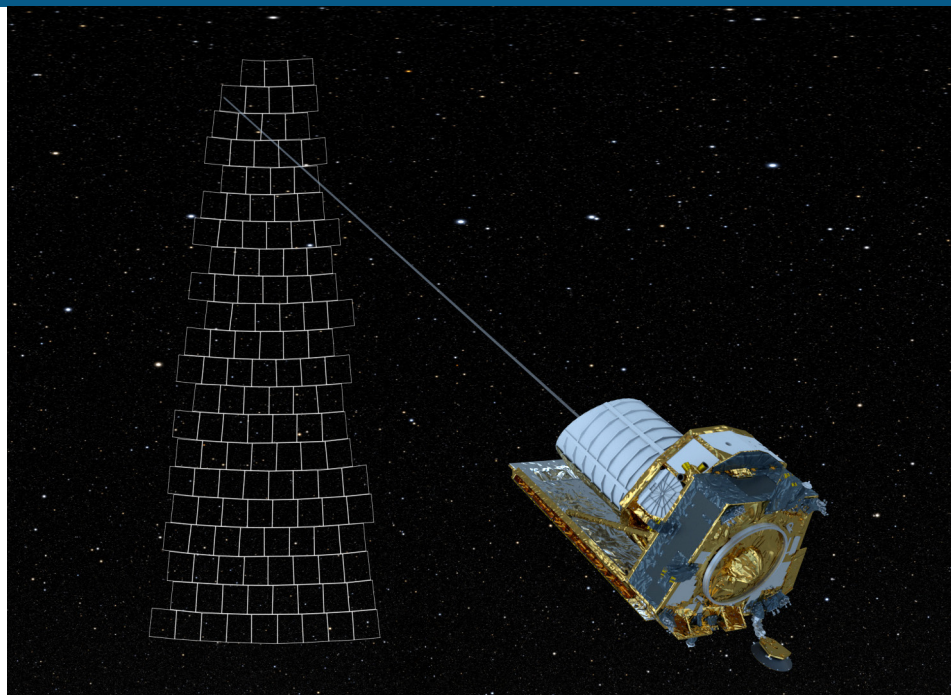


Figura 1. Impresión artística de Euclid realizando el mapeado del cielo. Cada recuadro representa una observación realizada a lo largo de 70 minutos, y cubriendo medio grado cuadrado de cielo. ESA.

compuesta por cuatro grupos de exposiciones sobre un mismo campo, separadas espacialmente por unos segundos de arco para garantizar la resolución espectral y evitar los huecos entre los detectores de los dos planos focales. Cada secuencia cubre, como se ha indicado, casi medio grado cuadrado de cielo (Fig. 1). Gracias a estas capacidades de apuntado y amplio campo de visión, Euclid será capaz de escanear y mapear casi un tercio del cielo con una alta resolución en seis años de misión nominal prevista.

EL PROGRAMA ERO

Aproximadamente un año antes del lanzamiento de Euclid se consideró la conveniencia de incorporar a la misión un programa de observaciones tempranas que cumpliera con los siguientes criterios:

- Los campos por observar deberían tener un fuerte valor, tanto científico como de comunicación al público en general.
- Deberían demostrar las capacidades de Euclid para cumplir con sus objetivos cosmológicos, pero también de ciencia adicional.
- La comunicación al público en general siempre primaría antes que el mérito científico.
- Las observaciones no tendrían que estar restringidas al área del escaneado principal de Euclid.
- Las observaciones se realizarían antes del comienzo del escaneado rutinario de Euclid.

El tiempo total asignado al programa sería de 1 día, siempre usando el bloque estándar de observación de Euclid. Por tanto, el programa ERO representaría un máximo de 10 grados cuadrados de cielo. Se nombró un comité científico del programa, con representantes de la ESA, el consorcio de Euclid y la comunidad, y se realizó una solicitud de propuestas. En mayo del 2023 se seleccionaron 6 de ellas, que involucraban la observación de 17 campos distintos en el cielo (en algún caso con más de un bloque de observación), la distribución espacial está reflejada en la Fig. 2. Más de 100 científicos las respaldaban.

IMPLEMENTACIÓN.

Tras su lanzamiento, Euclid pasó un mes en la trayectoria hasta su órbita final alrededor de L2, a un millón y medio de kilómetros de distancia. Durante esa primera fase se realizó el comisionado, verificando el correcto estado de la plataforma y encendiendo por vez primera los instrumentos para comprobar su funcionamiento. Se enfocó el telescopio y se realizó una descontaminación del sistema para eliminar agua atrapada y alcanzar posteriormente la temperatura operacional.

Tras esa primera fase, el plan de misión inicial preveía una fase de algo menos de dos meses (56 días) para implementar la llamada fase de verificación y caracterización. Normalmente, durante esta fase se corren por un lado las calibraciones que serán

usadas posteriormente en los seis años de escaneado, para validarlas, y por otro se ejecutan otras calibraciones necesarias para lograr una caracterización del sistema y los instrumentos, así como para generar algunos productos necesarios para el procesado en el segmento de tierra. Además, durante esta fase se valida el segmento de procesado en tierra. La planificación de esta fase representaba un importante reto, siendo responsabilidad del Centro de Operaciones Científicas (SOC) en ESAC, Madrid. Muchas de estas actividades que había que planificar tenían interdependencias entre sí y, al mismo tiempo, requerían de condiciones de apuntado específicas. Además, se precisaba que el sistema de apuntado del satélite funcionase correctamente y el telescopio estuviese perfectamente caracterizado.

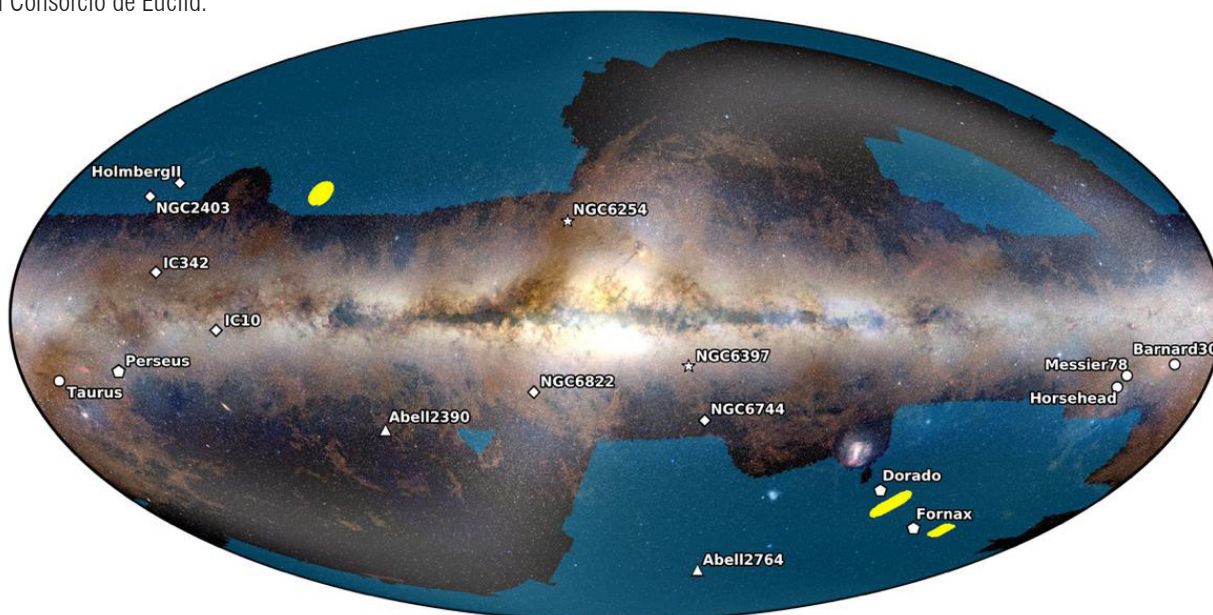
Las observaciones del programa ERO implicaban 17 apuntados distintos en el cielo usando la secuencia de referencia. Estos apuntados se incluyeron como un programa de calibración más entre los 31 que componían la fase de verificación, y se programaron buscando optimizar el tiempo disponible. Los condicionantes de planificación fueron:

- Visibilidad: marcada por la capacidad y restricciones de observación, regidas por las limitaciones en los ángulos de azimut y las restricciones solares.
- Ubicación: En huecos disponibles entre otros bloques de calibración que siempre tenían más prioridad.
- Optimización: minimizar el tiempo de desplazamiento desde y hacia los campos de ERO desde otros bloques.

No obstante, al acabar la fase de comisionado, y durante las primeras semanas de la fase de verificación, se detectaron distintas anomalías en la misión:

En primer lugar, y debido a los exigentes requisitos térmicos de Euclid para evitar deformaciones en la óptica, la misión tenía por diseño limitado el ángulo de azimut a una desviación máxima de 8 grados a uno y otro lado. Pero, con las primeras observaciones, se descubrió que, en determinada parte de ese rango permitido, las capas de protección de la cavidad óptica permitían, debido a alguna filtración, que la luz del Sol reflejada en algunas estructuras del

Figura 2. Distribución, en un mapa en coordenadas galácticas, de las 17 observaciones de ERO. El área cubierta por el mapeado principal de Euclid está mostrado en azul, las áreas amarillas son campos profundos que se revisitarán más de una vez a lo largo de la misión nominal. Se puede ver cómo las observaciones de ERO no se limitan al área del mapeado principal, mostrando su valor como ciencia adicional. El periodo de adquisición de las observaciones se realizó entre septiembre y noviembre del 2023. J.-C. Cuillandre en nombre del Consorcio de Euclid.



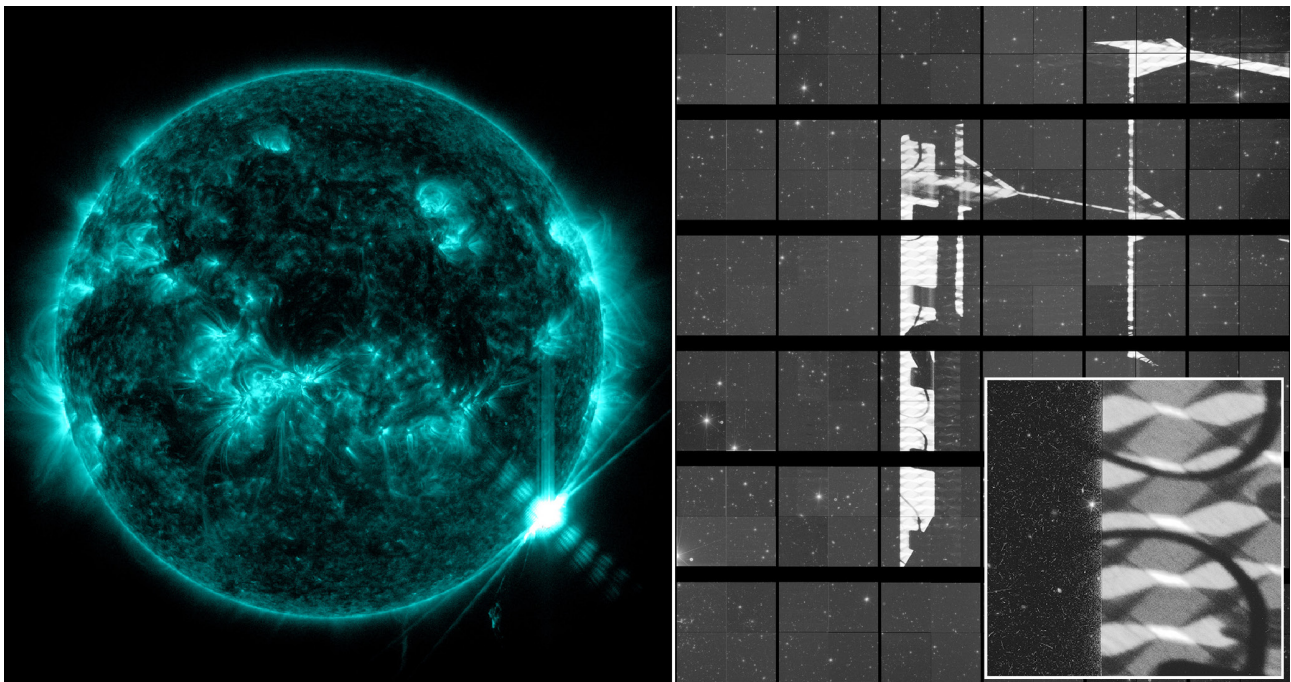


Figura 3. Plano focal de VIS afectado por una exposición a los rayos X que traspasan el panel solar del satélite. Detalle ampliando una zona para ver cómo se refleja la estructura de panel de abeja que está entre las uniones del panel solar. Euclid collaboration: Schirmer et al. (2025), NASA/SDO.

satélite penetrarse creando luz de fondo. La solución operacional que se adoptó fue restringir todavía más el rango de ángulos operacionales, de forma que se evitase la contaminación lumínica, lo que a su vez llevó a tener que reevaluar algunos objetivos de la fase de verificación y sus ventanas de visibilidad.

Por otro lado, también se halló que, en casos de elevada intensidad de actividad solar, los rayos X penetraban a través de resquicios en el panel solar, dejando una impronta sobre los detectores visibles (CCDs) del instrumento óptico (Fig. 3). La única solución operacional para este problema, que se estimó que afectaba en promedio a un 3% de las observaciones, era definir una máscara a la hora de procesar los datos alrededor de la impronta creada o, en los casos más severos, declarar como no válidas las observaciones. Esto imponía un riesgo de tener que repetir actividades de la fase de verificación.

Finalmente, y siendo lo que más afectó a esta fase, el guiado del satélite, clave en el funcionamiento de

la misión, se detectó como no fiable. En algunos casos las exposiciones y apuntados no lograban la estabilidad requerida (25 mas) y en cambio, mostraban un comportamiento errático del sistema que causaba grandes desviaciones de apuntado durante el tiempo de exposición. La causa de ello era que el sistema de guiado usaba CCDs (iguales a los del instrumento óptico), y estos no eran capaces de resolver la diferencia entre rayos cósmicos y estrellas; en determinadas situaciones perdían las estrellas guía seleccionadas de su catálogo, confundiéndolas con impactos cósmicos, tras lo que no conseguían volver a resolver una solución de apuntado (Fig. 4).

Este tercer problema fue el que hizo que el comienzo de la fase de verificación no pudiera completar sus objetivos, afectando también parcialmente a alguno de los apuntados del programa ERO. A la vista de ello, hubo que redefinir esa primera fase y se asignaron a los campos ERO ventanas en las zonas en las que la visibilidad se iba cerrando, en la esperanza de que no se viesan afectados por los problemas

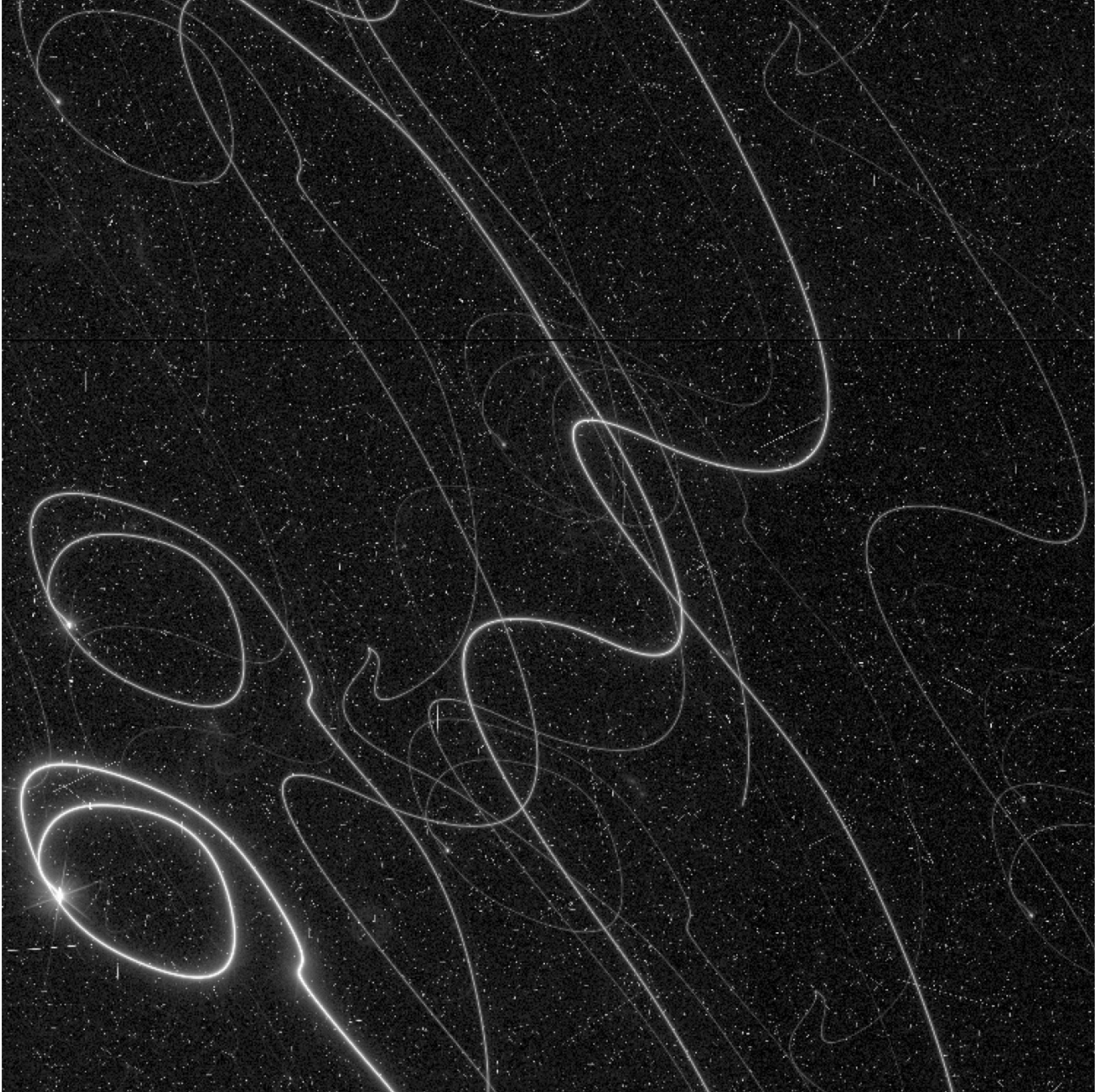


Figura 4. . Imagen de un cuadrante del plano focal del instrumento VIS (que tiene 144 de ellos) en el que se percibe en un caso extremo la inestabilidad de guiado a lo largo de la exposición. ESA, EC, TASI.

de apuntado o de rayos X, priorizando la parte más amplia de las ventanas para otras calibraciones con requisitos críticos de apuntado o ángulos solares.

En las siguientes semanas tras detectar el problema se implementaron algunas soluciones temporales para mitigar los problemas de apuntado, forzando al sistema a reiniciarse tras fallar el mismo. No obstante, la solución definitiva tardó en ser implementada, pasando por una redefinición del software del sistema de guiado para realizar doble exposiciones y descartar así los impactos cósmicos. Eso solo ocurrió a finales de septiembre del 2023. Con anterioridad, algunos de los campos planificados de ERO habían fallado debido a este problema. De hecho, solo 7 intentos de 16 observaciones devolvieron resultados válidos para ser procesados. Eso obligó a volver a incorporar al programa de calibración los campos fallidos o unos alternativos, junto a los pendientes de observar, lo que incrementó la complejidad de volver a tener que planificar la mayor parte del programa que incluía gran parte del resto de las calibraciones.

Finalmente, la fase de verificación, incluyendo la totalidad del programa ERO, concluyó el 2 de diciembre. Desde la corrección al problema de apuntado solo una observación ERO falló, siendo además una repetición extra de un campo ya observado, y por causas operacionales distintas al apuntado, por lo que no afectó al programa. La mayor parte se pudo observar antes de mediados de octubre, lo que permitió además seleccionar cinco campos para la primera comunicación pública de resultados.

PROCESADO DE DATOS Y COMUNICACIÓN

El procesado de los datos de la misión Euclid se realiza en un segmento científico en tierra donde se implementa una cadena de funciones diseñadas para soportar y procesar el ingente volumen de datos que representa la misión nominal. Como tal, su objetivo primario es la extracción de fuentes —galaxias— y su caracterización, tras haber calibrado y asignado astrometría a las observaciones y haberlas cruzado con datos de otros observatorios en tierra. Esta cadena, así como algunas de las calibraciones necesarias para su correcto funcionamiento, estaban siendo ajustadas o validadas durante la fase de verificación y por tanto durante la obtención de los datos del programa ERO, por lo que no se podía usar para

el procesado de este. Además, lo que se perseguía con este procesado en concreto era un impacto de comunicación hacia el público en general, pero resaltando además a la comunidad científica las capacidades de la misión, antes que la extracción de fuentes y galaxias de las imágenes. Eso requería de una cadena específica que se dedicase por completo al procesado de ERO. Esa tarea se encomendó a un equipo encabezado por Jean-Charles Cuillandre (CEA Paris-Saclay), miembro del consorcio científico de Euclid y experto en procesado de imágenes.

Los principales retos a los que se enfrentó eran procesar imágenes científicas sin referencias previas de calibración y apenas sin conocimiento del comportamiento de los instrumentos, telescopio o datos de calibración obtenidos en vuelo, por lo que determinados procesos tenían que ser extraídos de los propios datos de la observación. Además, uno de los objetivos del programa ERO era demostrar la capacidad única de Euclid para trabajar con galaxias y zonas de bajo brillo superficial, lo que requería un cuidadoso procesado para, preservando al máximo esa información, poder evitar el brillo de estrellas u otros objetos al frente. Finalmente, se perseguía componer una paleta de colores (usando la combinación de las imágenes monocromas con alta resolución espacial de VIS y las de fotometría en tres filtros de NISP) que aportase vistosidad y atractivo a las imágenes, pero al mismo tiempo ensalzase su contenido científico (Fig. 5).

Este procesado se realizó en ESAC durante los meses de septiembre y octubre usando una cadena de procesado específica, centrándose en generar las imágenes de cinco de los apuntados que mostraban más potencial de divulgación e impacto en el público en general. El resultado final fue una difusión pública de estas imágenes (todavía no de los datos base usados para ellas) el día 7 de noviembre del 2023, en un acto que consiguió una amplia repercusión en todos los medios y entre la comunidad científica (Fig. 6).

Los datos correspondientes a cada una de sus observaciones se pusieron a disposición de los miembros de las distintas propuestas ERO a partir de primeros de diciembre, para que pudieran estudiarlas, procesarlas en sus propias cadenas de procesado y desarrollar y escribir los artículos científicos asociados. Tras ese periodo propietario, el 23 de mayo del

Figura 5. Imagen compuesta en color usando VIS y los canales Y y H de NISP de una observación de 70 minutos de la Nebulosa Cabeza de Caballo. La imagen demuestra la combinación de campo amplio, resolución angular, profundidad y rango dinámico óptico. ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA imagen procesada por J.-C. Cuillandre (CEA Paris-Saclay), G. Anselmi.



2024, se realizó una segunda difusión de imágenes del programa, mostrando al público otros cinco campos, pero al mismo tiempo se puso a disposición de la comunidad científica en general los datos del programa (<https://euclid.esac.esa.int/dr/ero/>) al tiempo que se publicaban los artículos de los miembros de las seis propuestas originales del programa. Una vez más, el alcance y el impacto en la comunidad y en público en general fue muy relevante. Las 10 imágenes procesadas están disponibles a través del portal de acceso a los archivos científicos de la ESA, <https://sky.esa.int/esasky/> junto a los datos de todas las misiones operadas o colaboradas por ESA.

CONCLUSIÓN

Los beneficios de un programa de diseminación temprana de imágenes son innegables a la hora de mostrar las capacidades de un proyecto como Euclid, donde el potencial científico excede los objetivos primarios de la misión. Y esto es así no solamente para revelar al público no iniciado la belleza del universo

cercano o profundo, sino para intentar mostrar a ese público, pero también a la comunidad, la magnitud y calidad de los datos que la misión proporcionará, considerando que el programa apenas representa un 0.05% del tiempo total de la misión nominal o su cobertura del cielo. La planificación, adquisición y procesamiento del programa resultaron ser más complejos de lo inicialmente esperado debido a problemas no previstos, pero se logró completar con éxito gracias a la colaboración de centenares de personas involucradas en el mismo. Los primeros datos públicos de la misión nominal de Euclid, en marzo del 2025, demostrarán aún más toda la potencia de este detective cósmico.

Figura 6. Primeras imágenes mostradas el 7 de noviembre de 2023 del programa ERO. De arriba abajo, izquierda a derecha, IC342, M78 (nebulosa cabeza de caballo), NGC6397, NGC6822 y clúster de Perseo. ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA, imagen procesada por J.-C. Cuillandre (CEA Paris-Saclay), G. Anselmi.



OBSERVACIONES TEMPRANAS CON EUCLID:

Revisamos la Función Inicial de Masas en el cúmulo Sigma Orionis y la comparamos con la vecindad solar. Utilizando datos de Euclid, se detectaron nuevos objetos de masas planetarias, permitiendo extender la FIM a masas más bajas. De esta manera, se demuestra la capacidad de Euclid para avanzar en la comprensión de la formación subestelar.



Eduardo L. Martín
ege@iac.es

Maruska Zerjal
maruska.zerjal@iac.es

Instituto de Astrofísica de Canarias

David Barrado
barrado@cab.inta-csic.es

Centro de Astrobiología (INTA-CSIC)

Hervé Bouy
herve.bouy@u-bordeaux.fr

Université de Bordeaux

INTRODUCCIÓN: LA FUNCIÓN INICIAL DE MASAS Y LOS OBJETOS SUBESTELARES

Uno de los resultados más importantes de la formación estelar es la distribución del número de objetos resultantes en función de su masa, lo cual se denomina actualmente Función Inicial de Masas (FIM) y fue utilizada por primera vez en el trabajo de E. Salpeter (1955, ApJ, 121, 161), aunque la llamó función de masas original. La FIM de la vecindad solar de Salpeter se expresa como una función exponencial suave con sólo un exponente en el intervalo de masas entre 10 y 0.4 masas solares.

Los trabajos más recientes en la vecindad solar utilizando datos de los satélites Gaia y WISE indican que la función inicial de masas de la vecindad solar es más compleja de lo que encontró Salpeter (1955), aunque todavía se puede expresar como funciones exponenciales sencillas en diferentes intervalos de masas (P. Hennebelle & M.Y. Grudić 2024 ARAA, 62, 63). Una de las interrogantes más persistentes (C. Low & D. Lynden-Bell 1976 MNRAS, 176, 367) está todavía por resolver, se trata de la pregunta de si existe un límite inferior a la masa de los astros resultantes de la formación estelar debido a al criterio de estabilidad de Jeans para que se produzca el colapso gravitacional de una nube de gas interestelar. Para intentar resolver este enigma, es necesario empujar los límites de detección hacia objetos cada vez más débiles y cubrir áreas del cielo cada vez más amplias.

Es bien sabido que la luminosidad de un astro está relacionada con su radio y temperatura efectiva a través de la ley de Stefan-Boltzmann:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

La formación estelar produce estrellas y objetos menos masivos que se denominan subestelares. Estos objetos son más pequeños, más fríos, y por consiguientes menos luminosos que las estrellas.

Debido a sus bajas temperaturas superficiales, los objetos subestelares siempre son enanas ultrafrías, aunque no todas las enanas ultrafrías tienen masa subestelar. Desde finales de la década de los 90 se ha desarrollado una tipificación espectral extendiendo la nomenclatura de Harvard hacia tipos más tardíos mediante el añadido de las nuevas letras L, T, e Y.

Actualmente se considera que esas nuevas clases espectrales corresponden a los siguientes intervalos de temperatura efectiva: Enanas L: $T_{\text{efectiva}} \approx 1300 \text{ K} - 2400 \text{ K}$. Enanas T: $T_{\text{efectiva}} \approx 600 \text{ K} - 1300 \text{ K}$. Enanas Y: $T_{\text{efectiva}} \approx 600 \text{ K} - 200 \text{ K}$. Esta última clase espectral es la más reciente y todavía se encuentra en fase de desarrollo.

El estudio observacional de la vecindad solar ha dado lugar al descubrimiento de enanas L, T e Y que se deben haber formado durante la historia de la Galaxia. Sin embargo, la búsqueda directa de estos objetos en las regiones de formación estelar cercana no ha logrado todavía detectar enanas T e Y recién nacidas. Los objetos subestelares más fríos identificados en regiones de formación estelar tienen tipos espectrales L y todavía no se ha conseguido llegar hasta el tipo T para edades muy jóvenes (< 10 millones de años) ni se ha logrado determinar con fiabilidad la FIM hasta masas cercanas a la masa de Júpiter.

LAS OBSERVACIONES TEMPRANAS DE EUCLID

En el marco de la verificación científica de Euclid, la agencia espacial europea (ESA) convocó un concurso de propuestas para realizar las primeras observaciones en regiones que no tuvieran por qué estar incluidas en los mapeos del cielo extragaláctico que son el objetivo principal de la misión y a lo que dedicará más de cinco años de su tiempo de vida útil. Fueron seleccionadas seis propuestas tanto por su mérito científico como por su diversidad y su potencial para comunicar al gran público el potencial de la misión. Estos programas deberían mostrar al mundo que la misión espacial Euclides ofrece una combinación única de gran campo, profundidad y calidad de imagen capaz de avanzar las fronteras del conocimiento en varios campos de la Astronomía. El resumen de los 17 campos observados para el programa de observaciones tempranas (acrónimo ERO) se muestra en la ilustración 2 del artículo precedente a este (G. Buenadicha, R. Kohley & R. Vavrek).

Uno de los programas ERO seleccionados por la ESA es el que constituye el tema principal de este artículo. En el proceso de competición interna realizado por la ESA se presentaron doce proyectos ERO y fueron seleccionados sólo seis. Debido a diversos problemas en las etapas iniciales de la verificación científica, no se pudo ejecutar completamente los programas propuestos. En particular, en el caso de

nuestro programa, se completaron cuatro de las cinco observaciones aceptadas inicialmente.

En Mayo del 2024 se hicieron públicas las imágenes y los catálogos astrométricos y fotométricos asociados a todos los programas ERO que pudieron completarse. Se publicaron también los artículos genéricos de presentación de la misión y sus instrumentos, así como los primeros resultados de cada uno de los programas ERO. Nuestro equipo presentó los resultados del análisis de miembros conocidos del cúmulo abierto Sigma Orionis y la búsqueda de nuevos candidatos con masas planetarias.

Debido a que Euclid alcanza un límite de detección muy profundo se encontraron varios cientos de miles de fuentes en cada uno de nuestros campos en regiones donde Gaia sólo puede detectar unos pocos de miles de objetos por campo. Nos concentramos en esta primera fase en el estudio de objetos conocidos del cúmulo Sigma Orionis que miembros de nuestro equipo han estudiado desde hace más de dos décadas (M. R. Zapatero Osorio et al. 2000 *Science*, 290, 103; V. J. S. Béjar et al. 2001 *ApJ*, 556, 830; E. L. Martín et al. 2001 *ApJ*, 558, L117). Además, recientemente hemos revisado la pertenencia de estrellas y objetos estelares usando datos de Gaia DR3 (M. Zerkal, E. L. Martín & A. Pérez-Garrido 2024 *A&A*, 686, A161). Utilizamos sólo la mitad del campo de Euclid para minimizar los efectos de la alta extinción interestelar típica de las regiones de formación estelar activa. El campo utilizado se muestra en la ilustración número 1.

Definimos una serie de objetos de referencia en las imágenes de Euclid para caracterizar sus propiedades y aplicarlas en la búsqueda de nuevos objetos. Estos referentes tienen espectros publicados por lo que se sabe a ciencia cierta que son enanas ultrafrías de tipos espectrales M tardío y L. Estudiamos los intervalos de valores de estos objetos, concretamente en lo que se refiere a parámetros que indican que son fuentes puntuales como el SPREAD_MODEL de SExtractor (H. Bouy et al. 2013 *A&A*, 554, A101). El intervalo de los límites permitidos para el parámetro SPREAD_MODEL se ajustó rigurosamente a los objetos de referencia para definir una submuestra con alta probabilidad de estar dominadas por fuentes puntuales, lo cual implicó desechar la mayor parte de los objetos detectados en el campo como se muestra en la ilustración número 2.

Figura 1. Imagen compuesta con los filtros de Euclid análoga a la ilustración 6 del artículo precedente (G. Buenadicha, R. Kohley & R. Vavrek), pero rotada 90 grados para mostrar la orientación astronómica habitual de norte hacia arriba y este a la izquierda. La mitad de la derecha presenta un bajo enrojecimiento interestelar y es la que se seleccionó para el primer artículo ERO liderado por nuestro equipo. Se señalan en la imagen las identificaciones de las regiones celestes principales que se conocen en esta región.

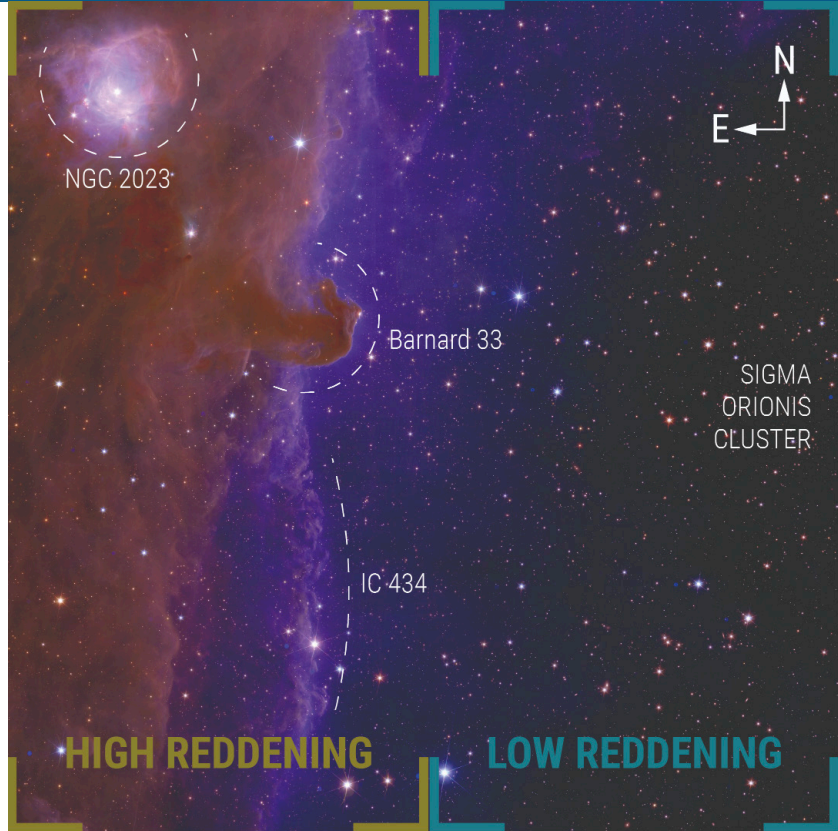


Figura 2. Distribución cuantitativa del parámetro SPREAD_MODEL en el filtro J de Euclid NISP relativa al total de fuentes detectadas en la mitad del campo de la ilustración anterior con bajo enrojecimiento (S Ori) y con alto enrojecimiento (not S Ori). El intervalo de valores de la muestra de objetos de referencia se muestra con dos líneas verticales.

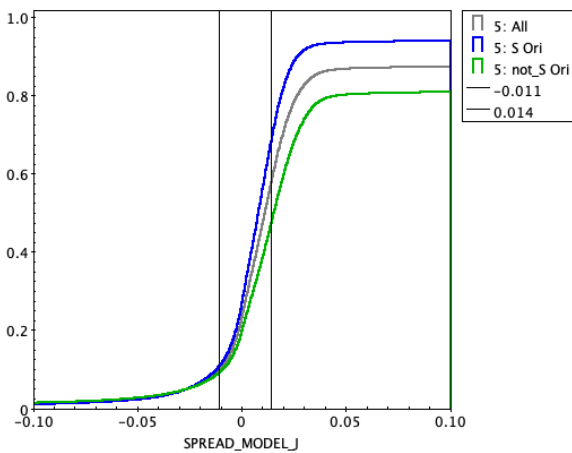
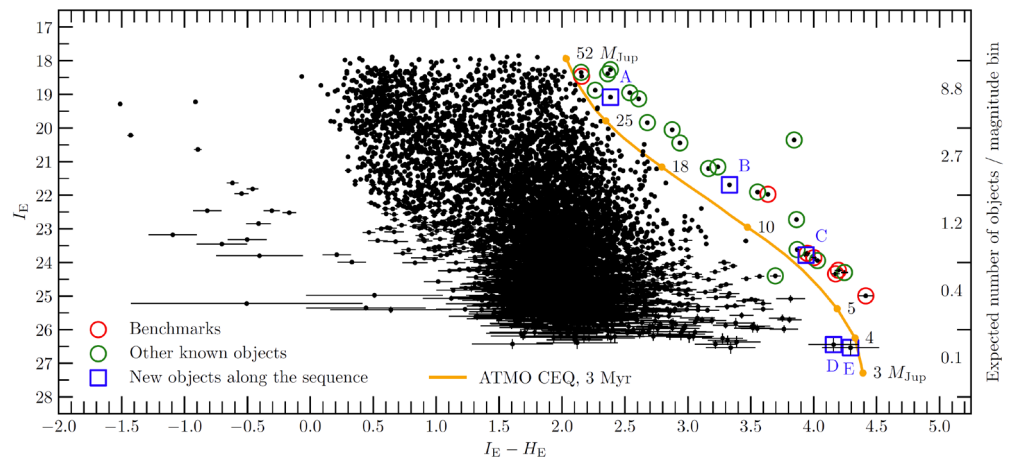


Figura 3. Diagrama color-magnitud de las fuentes puntuales seleccionadas con el parámetro SPREAD_MODEL en la mitad del campo con bajo enrojecimiento (S Ori). La secuencia teórica de objetos subestelares con masas entre 3 y 52 veces la de Júpiter para una misma edad coetánea de 3 millones de años se representa con una curva de color naranja según los modelos ATMO (I. Baraffe & M. Phillips, comunicación privada basada en los modelos de M. W. Phillips et al. 2020 A&A, 637, A38). Los miembros del cúmulo conocidos con caracterización espectroscópica se representan con círculos rojos (benchmarks), los candidatos conocidos sin caracterización espectroscópica se representan con círculos verdes y los candidatos nuevos encontrados con Euclid se representan con cuadrados azules.



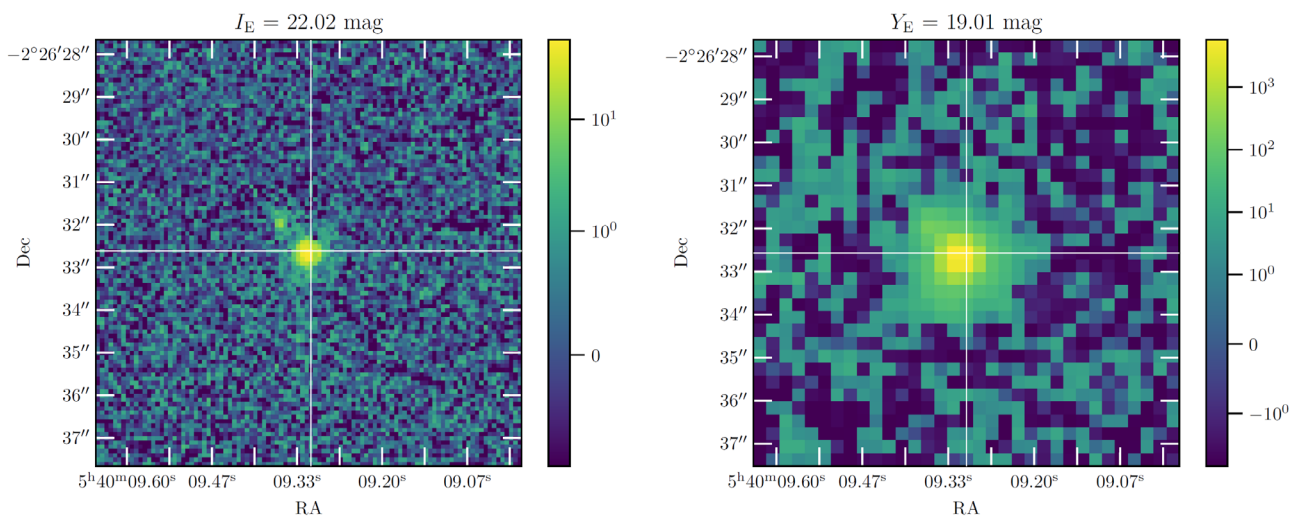


Figura 4. Imágenes de Euclid en los filtros VIS y NISP Y centradas en el objeto subestelar S Ori 52. Este objeto es miembro espectroscópicamente confirmado del cúmulo Sigma Orionis con un tipo espectral L0.5 y una masa de 15 veces la de Júpiter (V.J.S. Béjar et al. 2001, ApJ, 556, 830). La alta resolución angular del instrumento visible de Euclid permite resolver claramente un objeto débil a sólo 0.962 segundos de arco de separación que corresponden a 387.7 unidades astronómicas a la distancia del cúmulo (402 parsecs). En caso de confirmarse su naturaleza subestelar, la compañera de S Ori 52 podría tener una masa de 5 veces la de Júpiter.



Figura 5. Imagen de la región en torno al cúmulo M78 y la nebulosa NGC 2071 observada por Euclid para el programa ERO y hecha pública el 23 de Mayo del 2024. La imagen abarca todo el campo de visión de Euclid y los colores provienen de combinar los filtros Visible, Y y H. Crédito: ESA/Euclid/NASA.

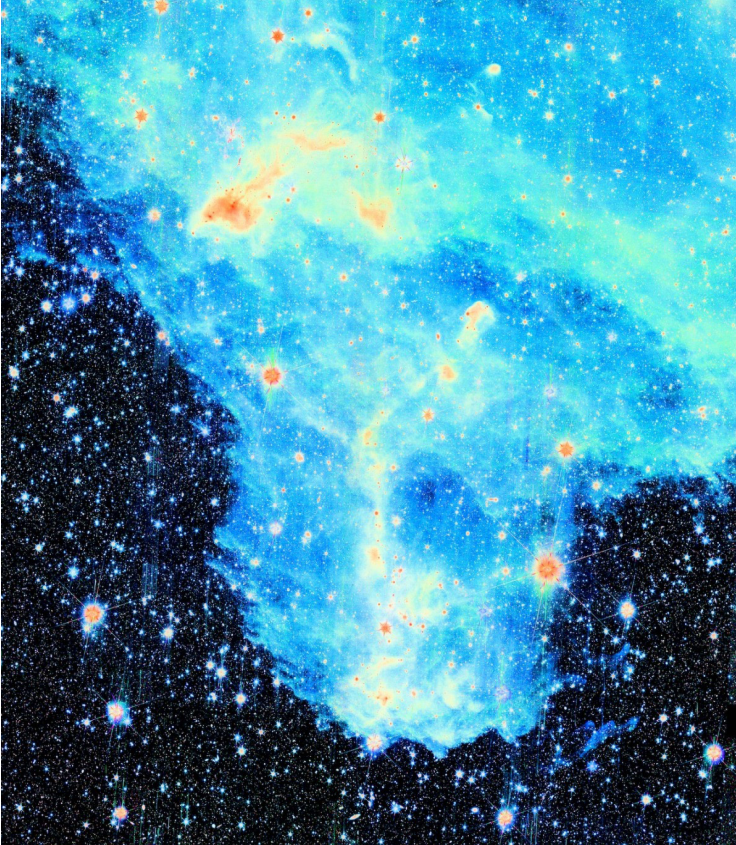


Figura 6. Imagen de la región en torno a la nebulosa Barnard 30 observada por Euclid para el programa ERO y hecha pública el 23 de Mayo del 2024. La imagen abarca todo el campo de visión de Euclid y los colores provienen de combinar los filtros Visible, Y y H. Crédito: David Barrado (CAB).

Figura 7. Diagrama color-magnitud de las fuentes puntuales seleccionadas con el parámetro SPREAD_MODEL en el campo del Toro. La secuencia teórica de objetos subestelares con masas entre 1 y 20 veces la de Júpiter (0.001 y 0.02 masas solares) para una misma edad coetánea de 1 millón de años se representa con una curva de color rojo según los modelos ATMO (I. Baraffe & M. Phillips, comunicación privada basada en los modelos de M. W. Phillips et al. 2020 A&A, 637, A38).

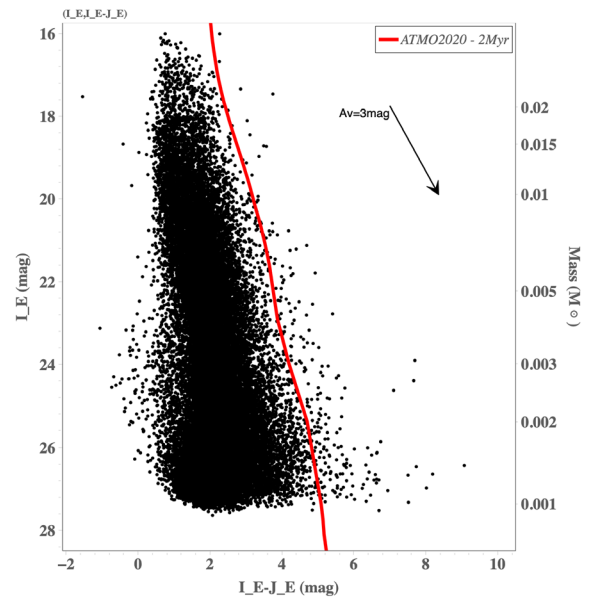
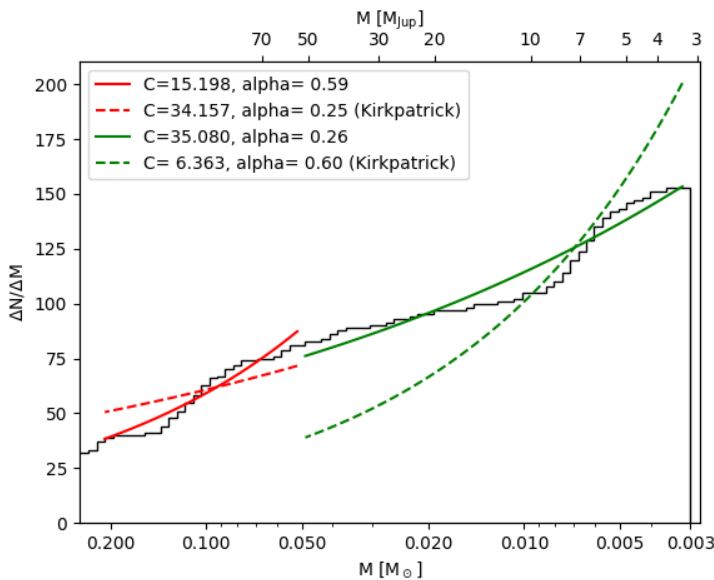


Figura 8. FIM del cúmulo Sigma Orionis estimada con los primeros datos de Euclid. Se han ajustado relaciones exponenciales de tipo Salpeter en los mismos intervalos de masa que la FIM de la vecindad solar (Kirkpatrick et al. 2024). Los valores encontrados para la FIM de Sigma Orionis no coinciden con los de la vecindad solar. Crédito: Marusa Zerjal (IAC).

La aplicación de un filtrado estricto para seleccionar fuentes puntuales en base a los parámetros de los objetos de referencia nos permitió obtener un diagrama color-magnitud muy limpio con el sistema fotométrico de Euclid en el cual se aprecia claramente como los objetos de referencia definen una secuencia bien separada de la nube de estrellas del campo (Ilustración 3). Gracias a este diagrama pudimos confirmar la probable pertenencia al cúmulo de candidatos conocidos que no tienen caracterización espectroscópica en la literatura y descubrir nuevos candidatos. Dos de los nuevos candidatos podrían tener unas 4 veces la masa del planeta Júpiter según los modelos evolutivos a edades muy tempranas (E.L. Martín et al. 2024 arXiv:2405.13497).

La alta resolución espacial y calidad de imagen de Euclid (0.1" en VIS) ha permitido también identificar nuevas candidatas a binarias subestelares (Ilustración 4) con separaciones angulares alrededor del segundo de arco. El estudio detallado de binarias subestelares usando los datos de Euclid constituye el tema central de la tesis de Sara Muñoz-Torres en el IAC.

Actualmente se está trabajando en la identificación de objetos subestelares en los campos del programa ERO, concretamente en dos regiones del complejo de formación estelar de Orion (Barnard 30 y M78, ver ilustraciones 5 y 6) y una zona de la asociación Toro-Auriga. Debido a que los objetos del Toro están más cerca de nosotros que los de Orion, es posible alcanzar masas más bajas que incluso podrían llegar por debajo de la masa de Júpiter (ilustración 7) si algunos de los candidatos son confirmados con observaciones de seguimiento usando telescopios de gran apertura como el James Webb o el Gran Telescopio de Canarias.

Además de la información proporcionada por las imágenes de Euclid, estamos comenzando a utilizar los datos de espectroscopía infrarroja sin rendija que hasta ahora no se han hecho públicos. Nuestro equipo tiene cuatro artículos en preparación, uno para cada una de estas regiones, y otro específicamente dedicado a la espectroscopía infrarroja sin rendija que proporciona Euclid.

Con los primeros datos del programa ERO se ha revisado la FIM del cúmulo Sigma Orionis y se ha extendido hacia masas más bajas. En este cúmulo

y en la vecindad solar se había logrado alcanzar a calcular la FIM hasta unas 6 veces la masa de Júpiter (K. Peña Ramírez et al. 2012 ApJ, 754, 30; J.D. Kirkpatrick et al. 2024 ApJS, 271, 55). En el primer trabajo usando los datos de Euclid se ha logrado llegar a estimar la FIM del cúmulo Sigma Orionis hasta un límite de 4 veces la masa de Júpiter (Ilustración 8) extendiendo así estudios previos en dominio planetario, y esto de manera conservadora sin llegar al máximo de sensibilidad que permiten los datos debido a la contaminación de objetos extragalácticos. Continuamos trabajando en la determinación de la FIM de Sigma Orionis y de otras asociaciones y cúmulos muy jóvenes usando los datos de Euclid, lo cual constituye el objetivo principal del proyecto de doctorado de Styliani Tsilia en el IAC.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

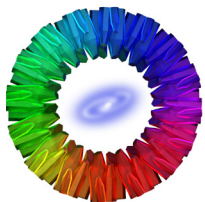
Con la diseminación a la comunidad científica y al gran público de las primeras imágenes y catálogos del telescopio espacial Euclid, la Agencia Espacial Europea ha logrado demostrar la magnífica capacidad de esta misión para avanzar en nuestra comprensión del Universo. Esto se ha producido en un tiempo récord de menos de un año después del lanzamiento. Nuestro equipo lidera uno de los programas ERO seleccionados por la agencia y ha contribuido a la verificación científica de la misión. Con nuestro programa ERO se ha demostrado que Euclid alcanza a detectar y caracterizar objetos subestelares de masas planetarias en las regiones de formación estelar, así como en los cúmulos y asociaciones estelares muy jóvenes de la vecindad solar. Con un programa de observaciones adicionales, esta misión espacial podría en el futuro determinar la FIM en el régimen subestelar hasta una masa similar a la de Júpiter y quizás resolver el enigma del posible límite inferior en las masas resultantes de los procesos de formación estelar.

AGRADECIMIENTOS

Agencia Europea Espacial. Colaboración científica Euclid. Financiación del European Research Council Advanced grant Substellar, proyecto número 101054354.

EXPLORANDO GALAXIAS EN VACÍOS CÓSMICOS:

El 15 de julio de 2024, el proyecto CAVITY realizó su primera distribución pública de datos (Data Release 1, DR1), poniendo a disposición de la comunidad científica espectros bidimensionales de 100 galaxias situadas en vacíos cósmicos, observadas con el telescopio de 3,5 metros y el espectrógrafo PMAS/PPak del Observatorio de Calar Alto. CAVITY, que es uno de los proyectos de Legado del Observatorio de Calar Alto, se centra en estudiar cómo el entorno a gran escala influye en el ensamblaje de masa, la evolución estelar y el contenido de materia oscura de estas galaxias.



Calar Alto Void Integral-field Treasury survey

Isabel Pérez
isa@ugr.es

Simon Verley
simon@ugr.es

Laura Sánchez Menguiano
lsanchezm@ugr.es

Tomas Ruiz-Lara
ruizlara@ugr.es

Universidad de Granada

Rubén García-Benito
rgb@iaa.es

Instituto de Astrofísica de Andalucía

En futuras distribuciones públicas de datos, CAVITY proveerá a la comunidad científica con información para una muestra de entre 300 y 400 galaxias. El proyecto se ha ampliado además con CAVITY+, que añade observaciones de gas molecular y atómico, así como imágenes ópticas profundas, permitiendo una visión completa del contenido bariónico de estas galaxias. Con el lanzamiento de DR1 y las futuras extensiones, CAVITY permitirá a la comunidad científica profundizar en el papel del entorno cósmico en la evolución de las galaxias y contrastar modelos de formación galáctica en los entornos más aislados del universo.

CAVITY es un proyecto que busca analizar las propiedades espaciales de las galaxias que habitan las regiones menos densas del Universo, conocidas como vacíos cósmicos. Sus objetivos principales son: 1) determinar cómo el entorno a gran escala influye en la acumulación de masa de las galaxias en vacíos; 2) comprender cómo la formación y las propiedades de las galaxias dependen de ese entorno; 3) identificar los factores que impulsan la transformación galáctica; y 4) analizar el contenido de materia oscura de las galaxias en vacíos (Pérez et al. 2024).

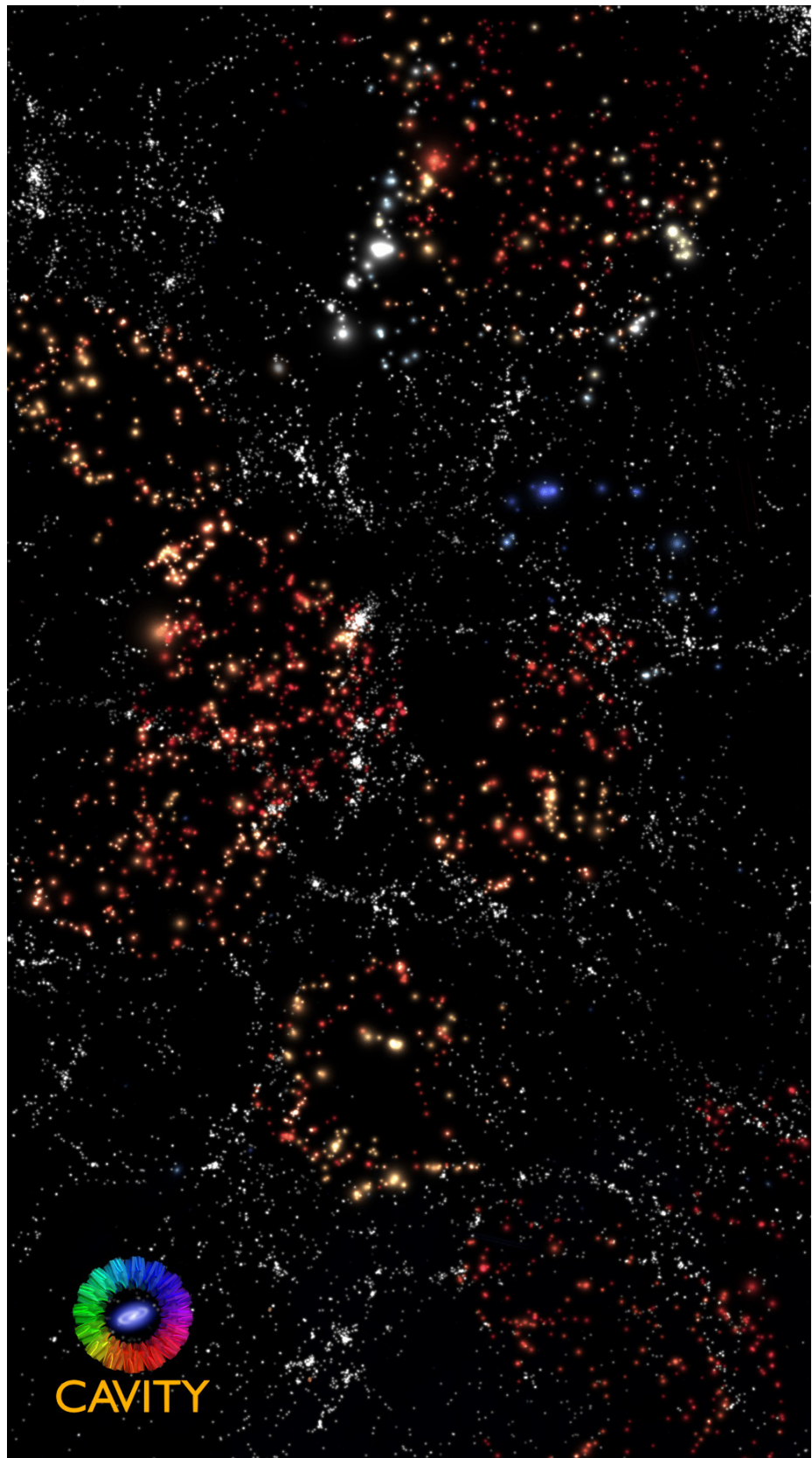
La colaboración de CAVITY está formada por más de 50 investigadores de instituciones internacionales repartidos en una decena de países. Actualmente, tres estudiantes de doctorado trabajan con datos de CAVITY para sus tesis, y otros tres en proyectos relacionados. Una tesis doctoral basada en el proyecto CAVITY fue defendida exitosamente en 2022 (Domínguez-Gómez, 2022).

CAVITY comenzó en enero de 2020, justo antes de la pandemia de COVID-19, a raíz de una convocatoria abierta del Observatorio de Calar Alto en busca de proyectos de Legado de gran impacto. CAVITY fue uno de los tres proyectos seleccionados, otorgándosele 110 noches de observación en el telescopio de 3,5 metros con el espectrógrafo PMAS. El observatorio inició la observación del proyecto en enero de 2021. En 2023, se concedió una extensión de 70 noches adicionales.

Hasta la fecha, se han generado 240 cubos de datos de galaxias, 100 de los cuáles se pusieron ya a disposición de la comunidad científica en el primer lanzamiento de datos de CAVITY (DR1, García-Benito et al. 2024) que tuvo lugar el 15 de julio de 2024. Los

CAVITY Y SU PRIMERA DISTRIBUCIÓN DE DATOS

Figura 1. Figura mostrando la distribución a gran escala el Universo. Las galaxias en vacíos están codificadas por tamaño y color, según su diámetro y corrimiento al rojo, respectivamente. Los puntos blancos de fondo representan las galaxias dentro de las Estructuras a Gran Escala del universo en el rango de corrimiento al rojo de 0.025-0.030, según los datos del Sloan Digital Sky Survey (imagen cortesía del CAVITY team).



datos están listos para su uso inmediato y pueden descargarse desde la base de datos del proyecto en <https://cavity.caha.es/>. En la segunda distribución pública de datos, prevista para julio de 2026, se espera distribuir a la comunidad una muestra ampliada de 300 cubos de galaxias en vacíos junto con mapas detallados de sus propiedades.

VACÍOS CÓSMICOS Y SU IMPORTANCIA EN EL ESTUDIO DE LAS GALAXIAS

La distribución de la materia a gran escala en el Universo, es decir, a escalas superiores a los 10 Mpc, no es uniforme; en cambio, se caracteriza por una estructura similar a una esponja, donde destacan filamentos, paredes, cúmulos y vacíos.

Estos vacíos son parte fundamental de la red cósmica, representando alrededor del 70% del volumen del Universo, aunque contienen solo el 10% de su masa. Los vacíos surgen de las fluctuaciones de densidad del campo primordial, y debido a su baja densidad, son regiones de gravedad débil que se expanden más rápido que el flujo de Hubble. A medida que se expanden, la materia es empujada hacia los filamentos que se contraen más rápidamente por su propia gravedad.

Cautun y colaboradores (2014) demostraron, a través de simulaciones numéricas cosmológicas de materia oscura, la compleja evolución de las estructuras del Universo, donde las subestructuras forman parte de la naturaleza jerárquica de la red cósmica. Los vacíos están poblados por halos de baja masa en comparación con los halos de las paredes, filamentos y cúmulos. A medida que el Universo evoluciona, las regiones de menor densidad tienden a expandirse y vaciarse aún más, ya que la materia fluye de las regiones menos densas hacia entornos más densos debido al efecto de la gravedad.

Los vacíos juegan un papel clave para entender la estructura a gran escala de la red cósmica. Aunque su nombre sugiera lo contrario, estos vacíos albergan galaxias, las cuales ofrecen valiosas pistas sobre cómo ensamblaron su masa en el Universo primitivo. Además, ayudan a esclarecer en qué momento los mecanismos internos comienzan a dominar la evolución galáctica y cómo estos procesos están influenciados por la estructura cósmica en la que se encuentran. Las observaciones parecen indicar que

las galaxias en vacíos son similares a las galaxias en regiones más densas, pero tienden a ser más azules y a tener morfologías de tipo más tardío (e.g. Rojas et al. 2004, 2005; Park et al. 2007; Constantin et al. 2008), aunque aún queda por determinar si las propiedades relacionadas con la tasa de formación estelar, las historias de formación estelar y las metalicidades tanto del gas como estelares y el contenido de materia oscura son similares a las de galaxias que habitan entornos más densos.

En un estudio reciente, realizado sobre los espectros del Sloan Digital Sky Survey (SDSS) de una muestra bien definida de galaxias en vacíos de CAVITY, junto con otras muestras de galaxias en paredes/filamentos, se concluye que la acumulación de masa estelar en las galaxias de los vacíos ocurre más lentamente que en entornos más densos (Domínguez-Gómez et al. 2023a). En el análisis de las metalicidades estelares de la misma muestra, Domínguez-Gómez et al. (2023b) encontraron que, en promedio, las galaxias de los vacíos tienen metalicidades estelares más bajas que las galaxias en entornos más densos. Aunque estos trabajos son pioneros, carecen de la información bidimensional crucial para discernir entre los distintos procesos físicos que impulsan las diferentes historias de formación estelar en diversas densidades.

Para poder caracterizar en detalle las posibles diferencias entre la evolución y formación de las galaxias en los diferentes entornos a gran escala del Universo se necesita caracterizar las propiedades de las galaxias en 2D ya que los diferentes caminos evolutivos dejarán huellas diferentes en las diferentes zonas de las galaxias. El espectrógrafo PMAS/PPak ofrece una poderosa herramienta para obtener datos de espectroscopía de campo integral, o IFS, por sus siglas en inglés (Integral Field Spectroscopy). Este tipo de tecnología permite capturar un espectro detallado en cada píxel de la imagen, lo que en el lenguaje de la IFS se denomina "spaxel". Gracias a esta capacidad podemos explorar propiedades espaciales en detalle, desde las variaciones químicas hasta la cinemática de galaxias u otras estructuras cósmicas extendidas. Todos estos factores impulsaron la necesidad de un estudio detallado y espacialmente resuelto sobre el ensamblaje de masa de las galaxias situadas en las regiones más vacías de la red cósmica, lo que motivó el desarrollo del proyecto CAVITY.

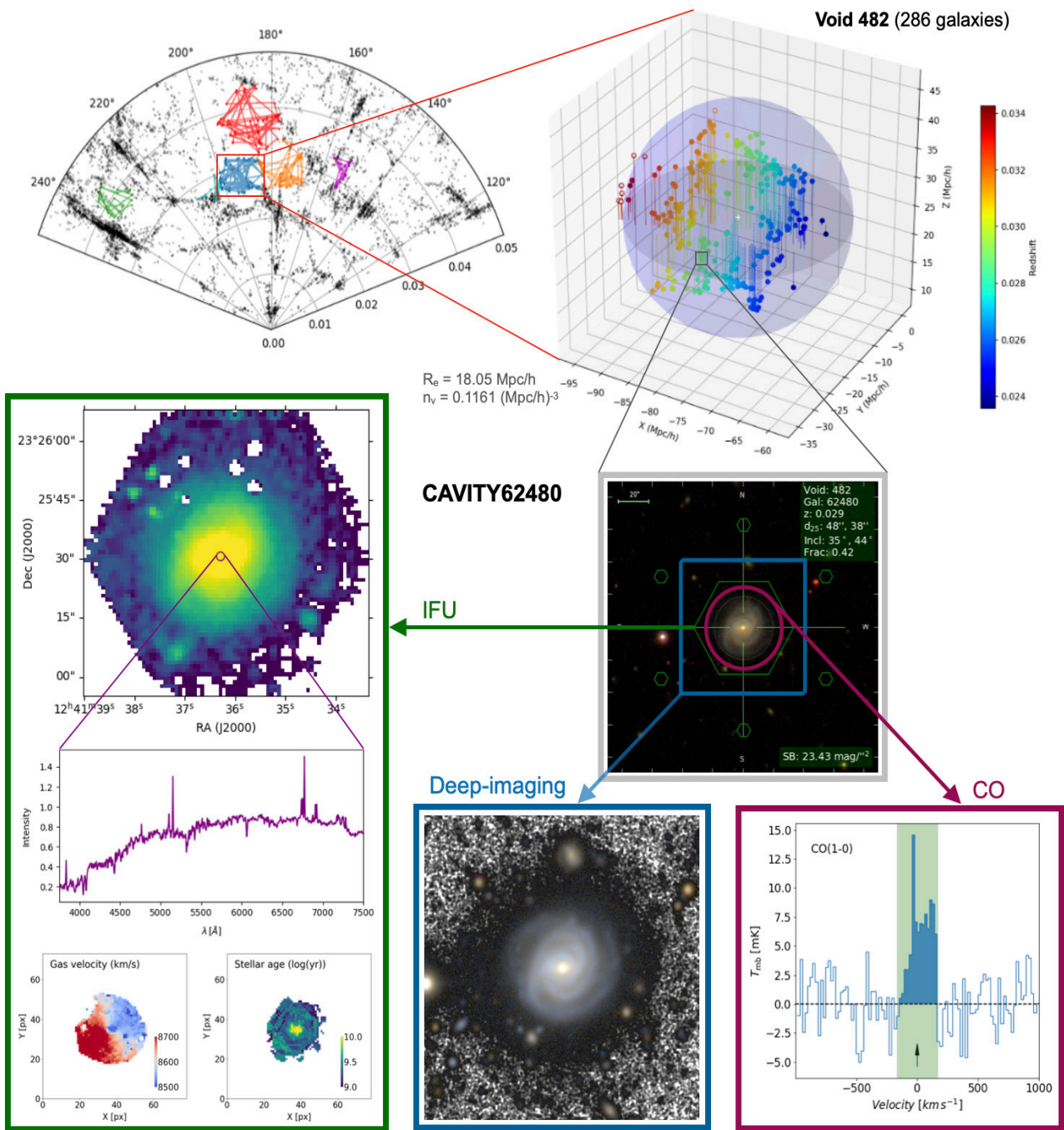


Figura 2. Resumen del proyecto CAVITY y su extensión CAVITY+. El panel de la derecha en el centro (enmarcado por un cuadrado gris) hace zoom en CAVITY62480, muestra una galaxia ubicada en el vacío 482 como ejemplo, mostrando su imagen en color del SDSS con la huella del instrumento PMAS (hexágono verde), el recorte del INT (cuadrado azul) y el haz de IRAM (círculo morado) superpuestos. La siguiente sección principal (enmarcada por el rectángulo verde) está dedicada a ilustrar los datos IFS. Representamos la luz integrada de la galaxia dentro del rango de longitudes de onda cubierto por el instrumento (en la parte superior), el espectro del spaxel central (en el centro) y los mapas de velocidad del gas y de la edad estelar (en la parte inferior) como ejemplos del potencial de los datos IFS para derivar distribuciones espacialmente resueltas de las propiedades de la galaxia. También mostramos una imagen en color utilizando la imagen profunda de las bandas g y r del INT (enmarcada por el rectángulo azul, panel inferior central) y el espectro integrado de CO(1-0) de las observaciones de IRAM (rectángulo morado, panel inferior derecho) para CAVITY62480 (Figura tomada de Pérez et al. 2024).

CAVITY+

Una visión completa del contenido bariónico de las galaxias en vacíos también debe incluir el gas atómico y molecular, así como información detallada sobre la cantidad y distribución de estrellas en las regiones exteriores de las galaxias. Por ello, con el objetivo de maximizar el impacto del proyecto y abordar plenamente los objetivos científicos propuestos, CAVITY se ha expandido para incluir observaciones dedicadas de gas molecular y atómico y obtención de imágenes ópticas profundas del estudio IFS.

Hasta la fecha, CAVITY+ cuenta con datos de CO(1-0) y CO(2-1) del radio telescopio IRAM para 106 galaxias de la muestra. Datos interferométricos de CO(1-0) con una resolución similar a la de los datos IFs provenientes del instrumento ALMA también están siendo obtenidos para una submuestra de 41 galaxias. Respecto al gas atómico, disponemos de datos del Telescopio de Green Bank (GBT) de todas aquellas galaxias de CAVITY que no contaban con datos públicos de HI de estudios previos (como ALFALFA). Por último, existe una campaña todavía en ejecución que abarca varios semestres para obtener imágenes profundas con la Cámara de Campo Amplia (INT), que hasta la fecha incluye 141 galaxias. Un ejemplo del potencial de CAVITY+ para caracterizar las galaxias de vacío se muestra en la Figura 2.

LA CIENCIA DE CAVITY+

La base de datos IFS para las 300 galaxias del estudio CAVITY, junto con toda la información adicional proveniente del proyecto ampliado CAVITY+, ofrecerá una oportunidad única para explorar las propiedades de las galaxias que residen en vacíos cósmicos. Esto permitirá a la comunidad científica abordar una gran cantidad de cuestiones astrofísicas. Dentro del ámbito de especialización del equipo de CAVITY, existe un interés particular en investigar aspectos como la acumulación de masa bariónica; el impacto del entorno a gran escala en la acreción de gas, la tasa específica de formación estelar y el contenido de gas molecular y atómico en galaxias de vacíos. Además, el equipo está particularmente interesado en obtener las historias de fusiones y acreciones de galaxias a partir de la distribución de luz en las regiones exteriores de las galaxias; la influencia del entorno local frente al entorno a gran escala en las propiedades generales de las

galaxias. Otro aspecto de interés y en el que trabajamos de manera activa es en caracterizar los efectos de la estructura a gran escala en la prevalencia de AGNs y su papel en el cese o la intensificación de la formación estelar en galaxias de vacíos. Por último, las propiedades y formación de galaxias enanas en estos entornos forman parte de uno de los proyectos clave de la colaboración.

En trabajos previos del equipo de CAVITY (Domínguez-Gómez et al. 2023a,b) concluimos que el ensamblaje de masa estelar en galaxias de vacíos ocurre más lentamente que en las galaxias de filamentos y paredes, y mucho más lentamente que en cúmulos, lo que sugiere la influencia de diferentes factores físicos en la evolución de las galaxias según su entorno a gran escala. Además, el análisis de la relación entre masa estelar y metalicidad en la misma muestra revela que el enriquecimiento ocurre de manera distinta según el entorno.

Hemos publicado recientemente los primeros artículos mostrando el potencial de los datos espacialmente resueltos de CAVITY donde se presentan las propiedades estelares de galaxias de vacíos usando cubos de datos de galaxias de CAVITY (Conrado et al. 2024, Sánchez et al. 2024). En este trabajo se descubrió que las galaxias espirales en vacíos tienden a tener densidades superficiales de masa menores y edades estelares más jóvenes que las galaxias situadas en entornos más densos, lo que sugiere la presencia de discos menos evolucionados en los vacíos cósmicos. Asimismo, en un artículo reciente sobre el contenido molecular de las galaxias en vacíos, Rodríguez et al. (2024) demostraron que el contenido total de gas molecular de las galaxias de CAVITY es similar al de las galaxias ubicadas en entornos más densos.

Con la publicación de cubos de las primeras 100 galaxias de CAVITY, con el desarrollo de la base de datos para CAVITY+, y los análisis científicos en marcha, es ahora cuando la explotación de los datos de CAVITY comenzará a ofrecer sus mejores resultados científicos. Estos datos proporcionarán nuevas perspectivas sobre cómo el entorno cósmico afecta a la evolución de las galaxias, contribuyendo de manera significativa al avance de nuestra comprensión del universo.

REFERENCIAS

- Cautun, M., van de Weygaert, R., Jones, B. J. T., & Frenk, C. S. 2014, MNRAS, 441, 2923
- Conrado, A. M., González Delgado, R. M., García-Benito, R., et al. 2024 A&A, 687, 98
- García -Benito, R., Jiménez, A.; Sánchez-Menguiano, L.; et al. 2024, accepted A&A, arXiv:2410.08265
- Domínguez-Gómez, J., Pérez, I., Ruiz-Lara, T., et al. 2023b, Nature, 619, 269
- Domínguez-Gómez, J., Pérez, I., Ruiz-Lara, T., et al. 2023a, A&A 680, 110
- Pérez, I., Verley, S., Sánchez-Menguiano, L., et al. 2024 A&A 689, 213
- Rodríguez, M.I.; Lisenfeld, U.; Duarte-Puertas, S.; et al. 2024, accepted A&A arXiv:2410.18078
- Rojas, R. R., Vogeley, M. S., Hoyle, F., & Brinkmann, J. 2004, ApJ, 617, 50
- Rojas, R. R., Vogeley, M. S., Hoyle, F., & Brinkmann, J. 2005, ApJ, 624, 571
- Sánchez, S.F.; García-Benito, R.; González Delgado, R.; et al. 2024 RmxAA, 60, 323

Figura 3. Foto de grupo del equipo CAVITY.



OPENS: TRAS LOS LADRILLOS DE LA VIDA

El proceso del origen de la vida viene caracterizado por saltos hacia la complejidad química. Estudios recientes muestran que dicha complejidad podría iniciarse en el medio interestelar, el cual podría formar compuestos de tipo prebiótico que posteriormente son incorporados a objetos menores del Sistema Solar como asteroides y cometas. Como resultado, nuestro planeta podría haber recibido grandes cantidades de material prebiótico durante el período de bombardeo masivo que experimentó hace 4100-3800 millones de años, favoreciendo la génesis de las primeras biomoléculas. El proyecto OPENS (the Onset of Prebiotic chEmistry iN Space)¹, que ha sido recientemente seleccionado por el European Research Council dentro del programa ERC CoG 2023, buscará aquellos compuestos prebióticos que se forman en el medio interestelar, y estudiará no sólo sus procesos de formación sino también los procesos de destrucción, determinando la probabilidad de supervivencia de los mismos en las condiciones extremas del medio interestelar.



OPENS



Funded by
the European Union



European Research Council
Established by the European Commission



Izaskun Jiménez-Serra

Centro de Astrobiología (CAB), CSIC-INTA
ijimenez@cab.inta-csic.es

LOS LADRILLOS DE LA VIDA

La cuestión del origen de la vida es uno de los grandes problemas sin resolver en el campo de las ciencias naturales. El consenso general entre la comunidad científica es que la vida surgió en un entorno con atmósfera, agua, y masa continental con nutrientes suficientes para la formación y posterior evolución de los primeros sistemas proto-biológicos [1]. Estos primeros sistemas aparecieron en entornos acuosos como océanos, lagos, lagunas, charcas intermitentes generadas por mareas o sistemas hidrotermales submarinos, en los que abundaba una gran diversidad de nutrientes (principalmente biopolímeros) como el ARN, ADN, proteínas, azúcares y fosfolípidos. Estos compuestos son comúnmente considerados como los componentes básicos de la vida o los “ladrillos de la vida” (ver [2]). En la actualidad se cree que estos nutrientes se sintetizaron abióticamente a partir de compuestos orgánicos más simples también presentes en dichos entornos acuosos.

El origen de dichos compuestos orgánicos más simples, sin embargo, se desconoce. Existen dos escuelas principales que intentan explicar cómo dichos compuestos precursores de ribonucleótidos², azúcares sencillos, proto-lípidos y amino ácidos, aparecieron en entornos acuosos para dar lugar a la primera entidad con vida. La primera escuela considera que estos compuestos orgánicos se sintetizaron in-situ en charcas o torrentes templados donde varias cadenas de reacciones químicas ocurrieron de forma simultánea dando lugar a las primeras biomoléculas (*origen endógeno*). En efecto, trabajos de química prebiótica muestran que, partiendo de compuestos precursores como, por ejemplo, la urea (NH_2CONH_2 ; molécula número (11) en la Figura 1), el 2-aminoxazol ($\text{C}_3\text{H}_4\text{N}_2\text{O}$; molécula número (17) en la misma figura), o la hidroxilamina (NH_2OH ; ver [3, 4]), se pueden sintetizar todos los ribonucleótidos (tanto pirimidinas como purinas) bajo las condiciones físicas y químicas de una Tierra primitiva.

La segunda escuela postula que una fracción significativa de esos compuestos prebióticos se podría haber sintetizado de forma exógena en la nebulosa proto-Solar, y caído a la superficie de nuestro planeta a través de una lluvia intensa de partículas de polvo interplanetario, y del impacto de cometas y meteoritos durante el periodo de bombardeo masivo

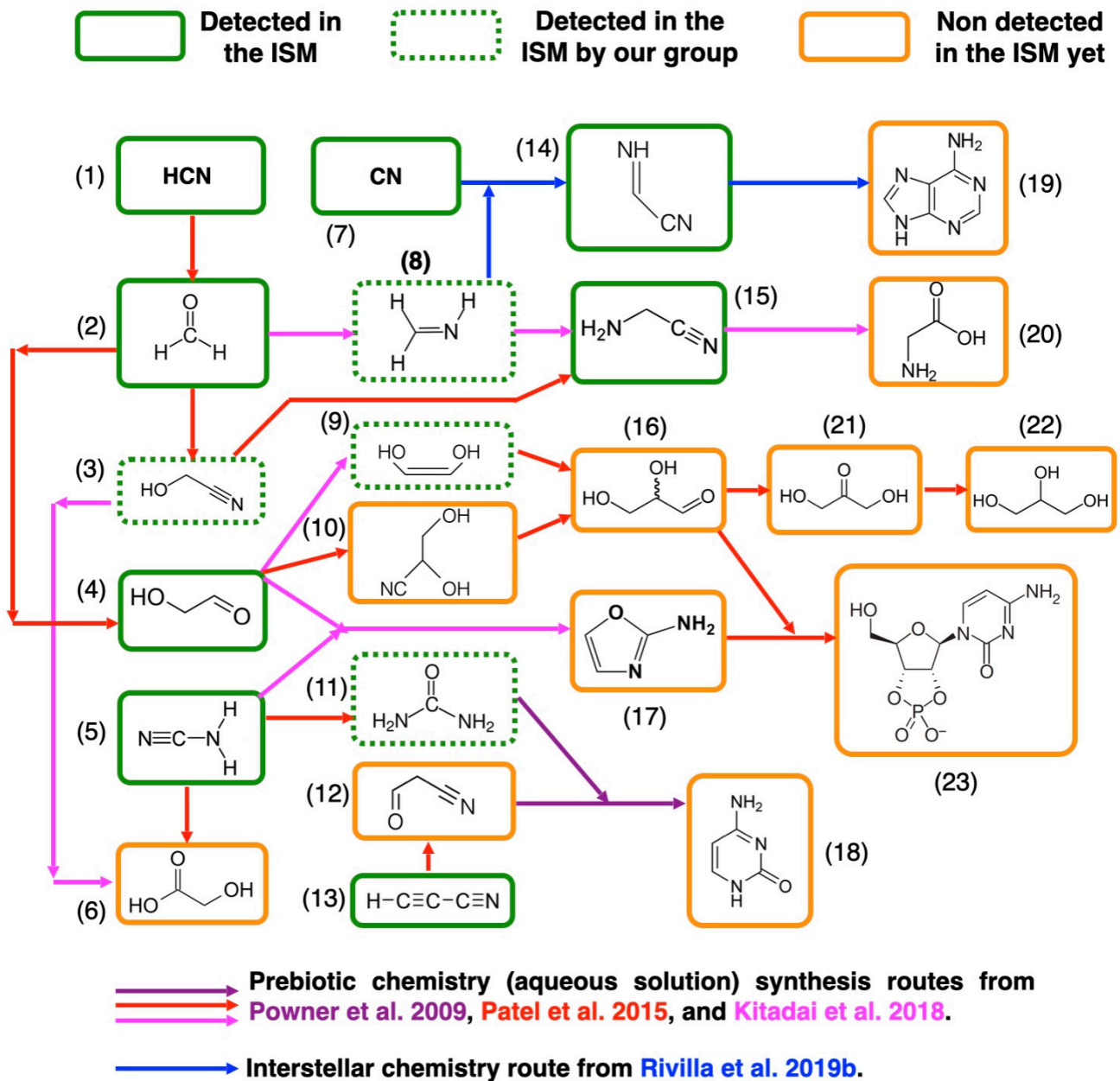


Figura 1. Esquema químico con las moléculas precursoras de ARN, azúcares, proteínas y proto-lípidos más relevantes en química prebiótica (figura adaptada de [13]). En verde mostramos las moléculas que ya se han detectado en el medio interestelar, incluido aquellas reportadas por nuestro grupo (ver las cajas con líneas discontinuas). Algunas de estas moléculas son el glicolonitrilo (ver la molécula número # 3 en el esquema), el etenediol (# 9), o la cianometanimina (molécula #14), un precursor de la nucleobase adenina. En naranja se muestran las especies moleculares que no se han detectado todavía en el medio interestelar, y que buscaremos dentro del proyecto OPENS (ver, por ejemplo, 2-amino-oxazol (molécula # 17 en el esquema) o el gliceraldehído (# 16).

tardío (del inglés “Late Heavy Bombardment period”) hace 4100-3800 millones de años. Se estima que la cantidad de material orgánico que pudo llegar a la superficie de la Tierra durante este periodo es de 10^{16} - 10^{18} kg [5], una cifra considerable teniendo en cuenta que la cantidad actual de materia orgánica presente en la biosfera es de 6×10^{14} kg. El estudio químico de meteoritos muestra, en efecto, que aminoácidos, nucleobases y azúcares forman parte de su composición (véase [6, 7, 8]). La misión *Rosetta* de la agencia espacial europea (ESA) también ha reportado la presencia de glicina, el amino ácido más sencillo, en el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko [9]; y la misión Hayabusa2 de la agencia espacial japonesa (JAXA) ha encontrado uracilo (una de las cuatro nucleobases que forman el ARN) en el asteroide Ryugu [10]. Todo esto, unido al hecho de que la vida apareció poco después del periodo del “Late Heavy Bombardment”, sugiere que la formación exógena de compuestos prebióticos y su posterior llegada a la superficie de la Tierra, fue decisiva en el proceso del origen de la vida [2, 11, 12].

EL MEDIO INTERESTELAR COMO ORIGEN DE COMPUESTOS PREBIÓTICOS

En la última década, y sobre todo gracias a la misión *Rosetta*, ha quedado patente que la composición química del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko (un cometa de la familia de Júpiter y cuyo origen se encuentra en el cinturón de Kuiper), es de origen pre-solar, es decir, de antes de que se formara el Sol. Por lo tanto, los compuestos orgánicos encontrados en dicho cometa proceden de la nube molecular parental interestelar [9, 14, 15].

El medio interestelar se caracteriza por condiciones de presión de ultra-alto vacío y temperaturas cercanas al cero absoluto (10 K). A pesar de estas condiciones extremas, el medio interestelar es una máquina extraordinaria generadora de compuestos químicos. Hasta la fecha (15/11/2024), se han descubierto más de 324 moléculas en el medio interestelar (ver e.g. [16])³, de las cuáles el 50% son moléculas orgánicas complejas (o COMs, del inglés “Complex Organic Molecules”, definidas como compuestos a base de carbono con al menos 6 átomos en su estructura molecular; [18]). Estas moléculas orgánicas complejas han despertado un gran interés en los últimos años en el campo de la astroquímica por su

posible relación con compuestos prebióticos. Algunos ejemplos de moléculas presentes en el medio interestelar y que aparecen en esquemas de química prebiótica son la formamida (NH_2CHO) o el glicolaldehído (CH_2OHCHO ; ver [4, 19, 20]).

UN MÉTODO INNOVADOR E INTERDISCIPLINAR

En el año 2018 comencé un nuevo proyecto en el Centro de Astrobiología (CAB) para entender si los compuestos clave en esquemas de química prebiótica se pueden formar en el medio interestelar. Para ello, guiamos la búsqueda de nuevos compuestos moleculares en el espacio usando los esquemas químicos propuestos en teorías del origen de la vida. En particular, nos centramos en los esquemas de formación de ribonucleótidos en el contexto de teorías de un mundo ARN primordial (ver [13]). En este escenario prebiótico las primeras formas de vida dependen únicamente del ARN, que almacena información genética y cataliza reacciones químicas (véase [3], [4], [12], [20]). Gracias a este enfoque novedoso, nuestro grupo en el CAB ha descubierto no sólo precursores clave en la formación de ribonucleótidos como, por ejemplo, urea (NH_2CONH_2 [13]), hidroxilamina (NH_2OH [21]), o glicolonitrilo (HOCH_2CN , [22]), sino también precursores en la formación de proto-lípidos (etanolamina, $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ [23]; o n-propanol, n- $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$, [24]; ver también la Figura 2), amino ácidos (amina vinílica, $\text{C}_2\text{H}_3\text{NH}_2$, y amina etílica, $\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_2$; [25]), y otras especies clave en la síntesis de proto-proteínas (ácido mono-tiofórmico, HC(O)SH [26]; o isocianato de etilo, $\text{C}_2\text{H}_5\text{NCO}$ [27]).

Para realizar todas estas nuevas detecciones, hemos obtenidos barridos espectroscópicos ultra-sensibles en el rango de 7mm, 3mm, 2mm y 1mm con los radiotelescopios de Yebes de 40m de diámetro y de 30m de diámetro del Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM), hacia la nube molecular G+0.693 situada en el centro de la Vía Láctea, uno de los mayores repositorios de material orgánico complejo en nuestra Galaxia. En total, desde 2019 hemos reportado la detección de 24 nuevas especies moleculares en el medio interestelar. Sin embargo, estas especies representan la punta del iceberg, ya que nuestros estudios espectroscópicos de alta sensibilidad aún no han alcanzado el límite de confusión en líneas moleculares. Además, hasta ahora sólo nos hemos centrado en la búsqueda de moléculas relativamente

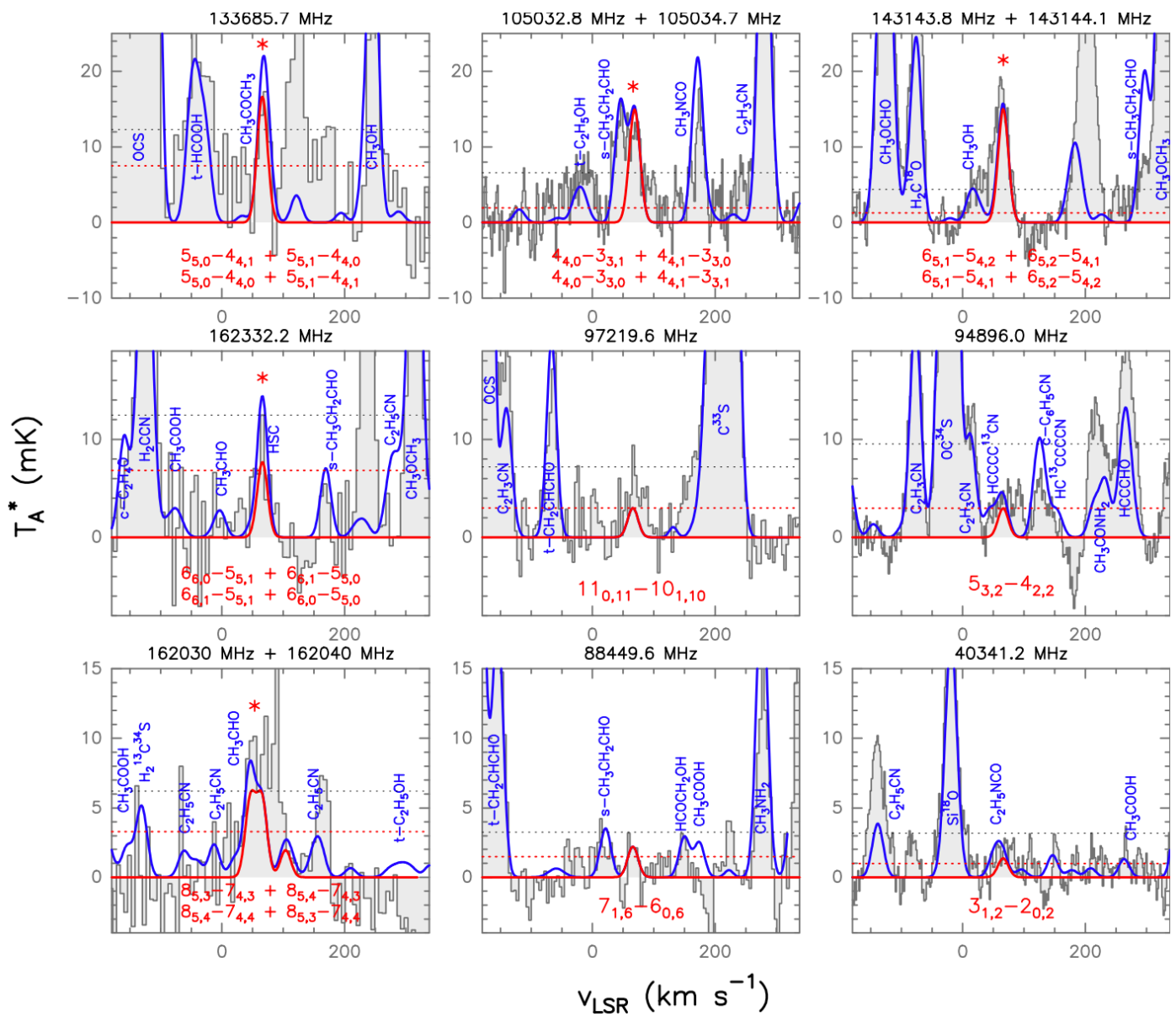


Figura 2. Transiciones detectadas del conformero Ga de n-propanol. En negro y gris se muestra el espectro medido hacia la nube molecular G+0.693 situada en el Centro Galáctico. En rojo se indica la contribución individual de las transiciones de n-propanol, mientras que en azul se representa la contribución de todas las moléculas detectadas hasta la fecha en esta fuente (ver nombres en azul). Figura extraída de [24].

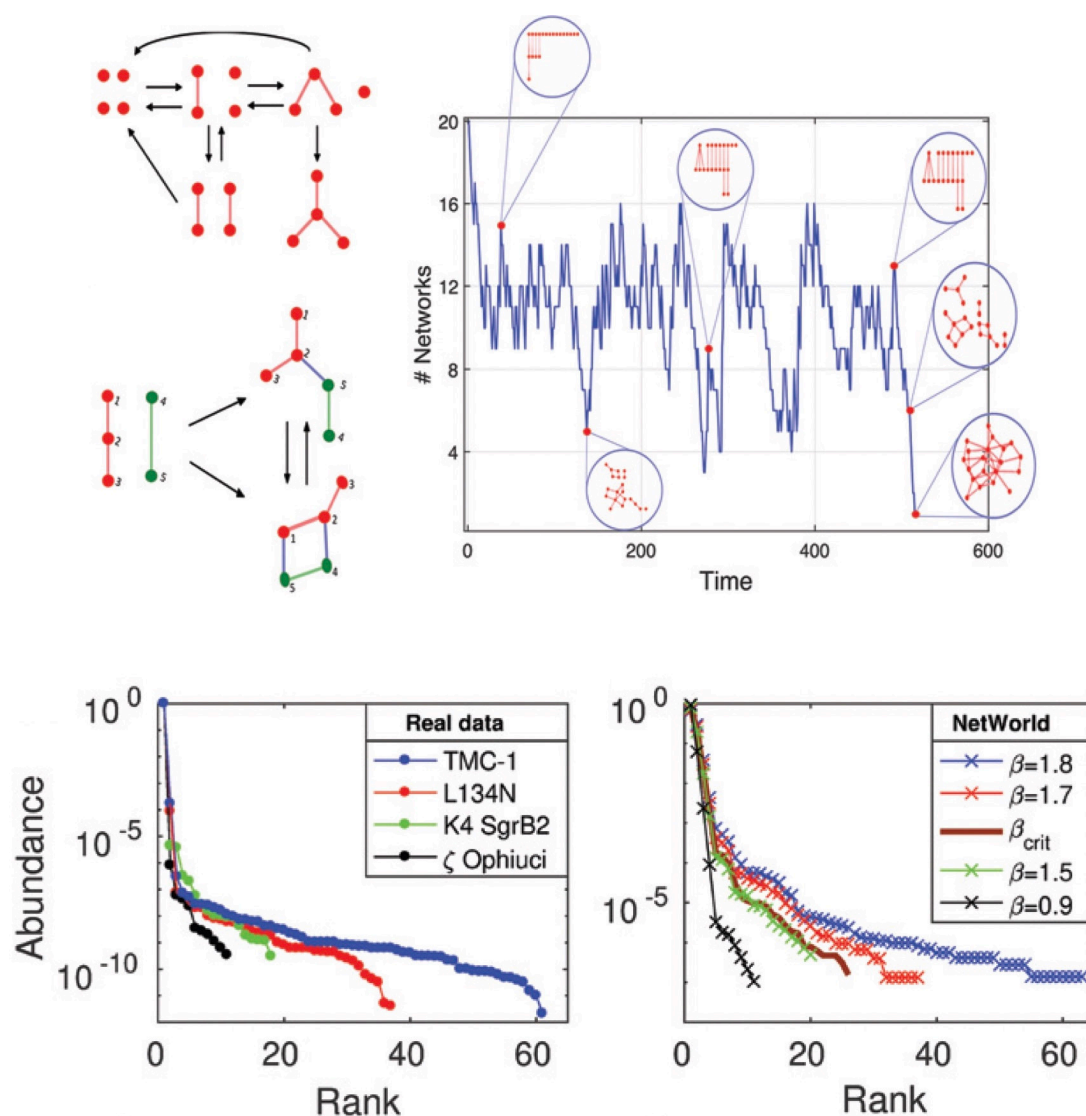


Figura 3. Paneles superiores: Descripción de la dinámica evolutiva de NetworkWorld. Paneles inferiores: Comparación entre datos reales de abundancias moleculares en varias nubes interestelares con distintos niveles de extinción, y las predicciones de NetWorld. Figura adaptada de [28].

pequeñas y, por lo tanto, desconocemos si moléculas prebióticas de mayor complejidad también están presentes en el medio interestelar.

OPENS

El proyecto OPENS (the Onset of Prebiotic chemistry iN Space)¹ pretende descubrir qué compuestos orgánicos, de los propuestos como esenciales para el origen de la vida, están presentes en el medio

interestelar, y cuáles de ellos son heredados por sistemas planetarios jóvenes. Pero, ¿cuál es el origen de la complejidad química observada en el medio interestelar? Para dar respuesta a esta pregunta, OPENS también investigará la emergencia de dicha complejidad química interestelar desde un punto de vista abstracto y novedoso utilizando un marco teórico basado en Teoría de Redes Complejas que acabamos de desarrollar (*Networld*; ver [28] y Figura 3).

OPENS construirá un equipo con expertos en observaciones astronómicas, en experimentos de laboratorio con análogos de hielos interestelares, en cálculos cinéticos moleculares, y en teoría de redes complejas. Estudiaremos la complejidad química en el espacio tanto en la fase gas como en la fase sólida en el polvo interestelar, abarcando compuestos prebióticos (incluyendo moléculas quirales) precursores de ribonucleótidos, proto-lípidos, proto-proteínas y azúcares. Estudios piloto que hemos realizado recientemente muestran que no todas las moléculas propuestas en esquemas de química prebiótica tienen la misma capacidad de supervivencia en las condiciones extremas del medio interestelar. Por ejemplo, la urea es mucho más resistente a la radiación UV o a la interacción con rayos cósmicos que el 2-amino-oxazol (véase [29] y [30]), lo que proporciona información clave sobre qué especies son más susceptibles de ser transferidas a asteroides y cometas en la nebulosa proto-solar. Finalmente, puesto que la química del medio interestelar se puede considerar como un sistema complejo, OPENS determinará si la emergencia de moléculas orgánicas complejas en el espacio es el resultado de reglas universales regidas por la Teoría de la Complejidad.

La detección en el medio interestelar de los compuestos esenciales para el origen de la vida en OPENS, representará un gran avance en astroquímica, abriendo un nuevo campo de investigación en el que la química de los componentes básicos de la vida podrá estudiarse directamente en el espacio. Esto nos permitirá comprender cómo pudo originarse la vida en nuestro planeta y qué probabilidades tiene de que surja en otros lugares del Universo.

NOTAS

¹ <https://sites.google.com/view/ercopens/home>

² Los ribonucleótidos son las unidades elementales del ARN y están formados por una molécula de ribosa, una nucleobase, y un grupo fosfato.

³ Una lista actualizada de las moléculas detectadas en el medio interestelar se puede encontrar en el Cologne Database for Molecular Spectroscopy, o CDMS ([17] y <https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules>).

REFERENCIAS

- [1] Dohm & Maruyama, 2015, *Geoscience Frontiers*, 6, 95-101.
- [2] Kitadai et al. 2018, *Geoscience Frontiers*, 9, 1117-1153.
- [3] Powner et al. 2019, *Nature*, 459, 239.
- [4] Patel et al. 2015, *Nature Chemistry* 7, 301-307.
- [5] Chyba & Sagan 1992, *Nature*, 355, 125-132.
- [6] Cronin & Pizzarello 1986, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50, 2419-2427.
- [7] Glavin et al. 2006, *Meteoritics and Planetary Science*, 41, 889-902.
- [8] Furukawa et al., 2019, *PNAS*, 116, 49
- [9] Altwegg et al. 2016, *Science Adv.*, 2, e1600285
- [10] Oba et al. 2023, *Nature Communications*, 14, 1292
- [11] Ruiz-Mirazo et al. 2014, *Chem Rev*, 114, 285
- [12] Menor-Salván et al., 2020, *ChemBioChem*, 21, 3504
- [13] Jimenez-Serra et al. 2020, *Astrobiology*, 20, 1048J
- [14] Altwegg et al. 2019, *ARA&A*, 57, 113A
- [15] Alexander et al. 2017, *M&PS*, 52, 1797A
- [16] McGuire et al. 2022, *ApJS*, 259, 30M
- [17] Endres et al. 2016, *Journal of Molecular Spectroscopy*, 327, 95
- [18] Herbst & van Dishoeck 2009, *Ann. Rev. of Astr. and Astroph.*, 47, pp 427- 480
- [19] Saladino et al. 2012, *Physics of Life Reviews* 9, 84-104
- [20] Becker et al., 2019, *Science*, 366, 76
- [21] Rivilla et al. 2020b, *ApJL*, 899, L28
- [22] Zeng et al. 2019, *MNRAS*, 484, L43-L48
- [23] Rivilla et al., 2021, *PNAS*, 118 (22) e2101314118
- [24] Jimenez-Serra et al. 2022, *A&A*, 663A, 181J
- [25] Zeng et al., 2021, *ApJL*, 920, L27
- [26] Rodríguez-Almeida et al. 2021a, *ApJL*, 912, L11
- [27] Rodríguez-Almeida et al. 2021b, *A&A*, 654, L1
- [28] García-Sánchez et al. 2022, *PNAS*, 119 (30) e2119734119
- [29] Mate et al. 2021, *ApJ*, 909, 123M
- [30] Herrero et al. 2022, *MNRAS*, 517, 1058H

La mayoría de los campos de la astronomía están cambiando rápidamente. Existen, o pronto estarán disponibles, grandes cantidades de datos observacionales sin precedentes. Ante este incremento de datos, la Inteligencia Artificial o Aprendizaje Automático se ha convertido a lo largo de la última década en un ingrediente cada vez más habitual en el análisis científico en astrofísica. El objetivo de esta reseña es proporcionar una visión global y relativamente superficial de la evolución del campo en los últimos años así como de los desarrollos presentes y futuros. Es imposible abarcar todas las aplicaciones en todos los campos de la astrofísica, por ello me centro casi exclusivamente en el uso de la IA para astronomía extragaláctica, evolución de galaxias y cosmología, campos que conozco de primera mano.



Marc Huertas-Company
Instituto de Astrofísica de Canarias
marc.huertas.company@gmail.com

Aunque las aplicaciones del aprendizaje automático a la astronomía existen desde hace al menos treinta años, los últimos años han sido testigos de un aumento sin precedentes de los métodos de aprendizaje profundo traducido en un incremento exponencial de las publicaciones (Figura 1). Este resurgimiento se ve impulsado por importantes avances en el campo del Aprendizaje Automático desde la popularización de las Redes Neuronales Convolucionales (CNNs) hace más de una década (Krizhevsky et al., 2012).

VOLUMEN Y COMPLEJIDAD DE DATOS SIN PRECEDENTES

Estudios espectrofotométricos modernos como el Legacy Survey of Space and Time (LSST; Ivezić et al., 2019) o Euclid (Laureijs et al., 2011) proporcionarán o están ya proporcionando espectros e imágenes de alta calidad de cientos de millones de galaxias. Los cartografiados espectroscópicos de campo integral a bajo y alto desplazamiento al rojo están alcanzando tamaños estadísticamente relevantes (por ejemplo, MaNGA - Bundy et al., 2015) que permiten resolver la estructura interna de las galaxias más allá de las propiedades integradas.

Además, nuevas instalaciones como el telescopio espacial James Webb (JWST) están abriendo la ventana a un desplazamiento al rojo y un régimen de masas estelares completamente nuevos, tanto en imágenes como en espectroscopia, y podremos ser testigos de la aparición de las primeras galaxias del universo. Las instalaciones de rayos X y radio (por ejemplo, SKA, Athena) sondearán el gas frío y caliente de las galaxias con una resolución mejorada. En el ámbito teórico, la potencia de cálculo ha evolucionado hasta el punto de que ahora podemos generar simulaciones realistas de galaxias en un contexto cosmológico que abarca la mayor parte de la historia del Universo (por ejemplo, TNG - Pillepich et al., 2018) que reproducen adecuadamente un gran número de propiedades observables. En este contexto de creciente complejidad y rápido aumento de los volúmenes de datos, se ha convertido en un nuevo reto para la comunidad combinar y extraer con precisión información científicamente relevante de estos conjuntos de datos.

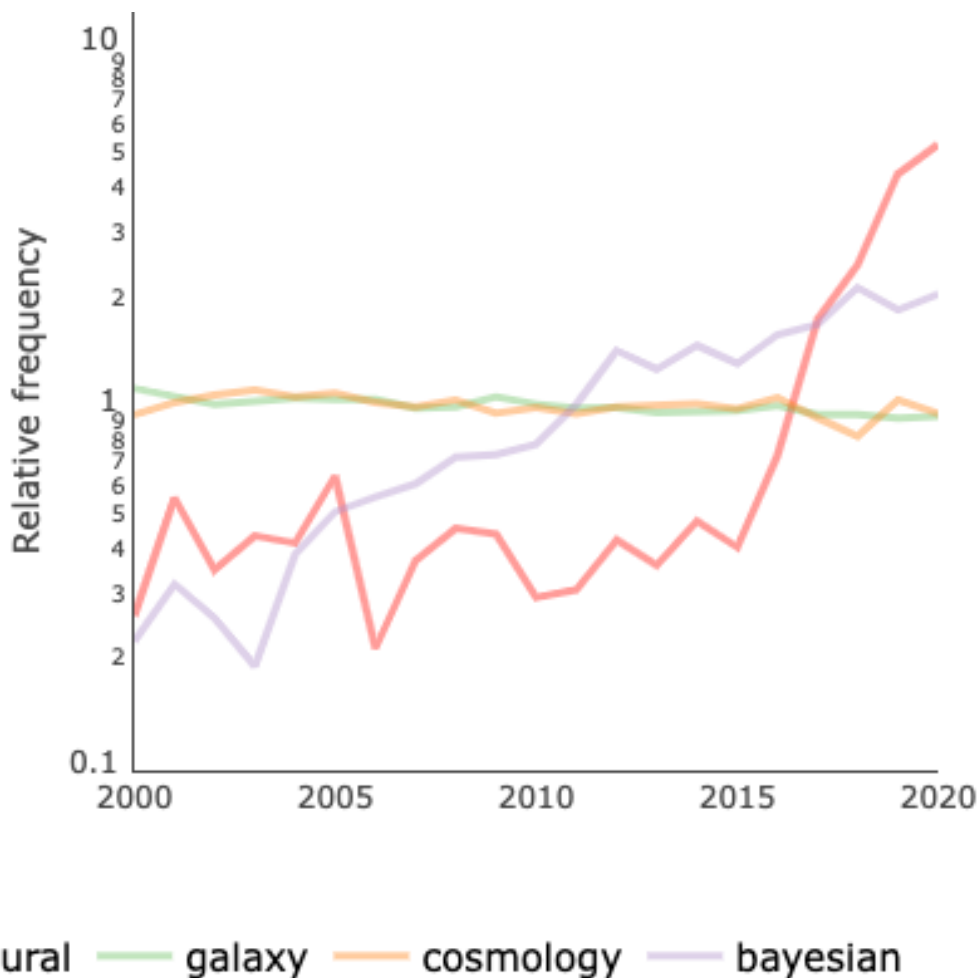


Figura 1. Cambio relativo del número de publicaciones en arXiv:astro-ph con diferentes palabras clave en el abstract a lo largo de los últimos años. El número de trabajos que mencionan redes neuronales ha experimentado un crecimiento sin precedentes en los últimos años, significativamente más pronunciado que otros ámbitos de la astrofísica. Fuente: ArXivSorter. Figura tomada de Huertas-Company & Lanusse (2023)

APRENDIZAJE AUTOMÁTICO Y ASTROFÍSICA: UNA HISTORIA DE MÁS DE 30 AÑOS

Hay una larga historia de aplicaciones de aprendizaje automático en astronomía que comenzó mucho antes del más reciente boom del aprendizaje profundo. Diferentes tipos de algoritmos de aprendizaje automático, incluidas las primeras redes neuronales artificiales (ANN), árboles de decisión (DT), bosques aleatorios (RF) o algoritmos kernel como las máquinas de vectores de soporte (SVM), se han aplicado

a diferentes áreas de la astrofísica desde la segunda mitad del siglo pasado. Por ejemplo, las ANN, los árboles de decisión y los mapas autoorganizativos (SOM) se han aplicado ampliamente a la clasificación de estrellas y galaxias (Odewahn et al., 1992; Weir et al., 1995; Miller et al., 1996; Bazell et al., 1998; Andreon et al., 2000; Qin et al., 2003; Ball et al., 2006). El problema de la clasificación de la morfología de las galaxias también ha sido objeto de una cantidad significativa de trabajos relacionados con

el aprendizaje automático (Storrie-Lombardi et al., 1992; Lahav et al., 1995, 1996; Odewahn et al., 1996; Naim et al., 1997; Madgwick et al., 2003; Cohen et al., 2003). Ball et al. (2004) es probablemente el primer trabajo en utilizar ANNs para clasificar galaxias en el SDSS. En la primera década del presente siglo las SVM se hicieron más populares y también se utilizaron para proporcionar catálogos de morfología de galaxias (Huertas-Company et al., 2008, 2011). Los Árboles de Decisión también se han aplicado a otras tareas de clasificación como la separación AGN/galaxia (White et al., 2000; Gao et al., 2008). Más allá de la clasificación, el aprendizaje automático, y especialmente las ANNs, se han aplicado ampliamente al problema de la estimación de corrimientos al rojo fotométricos (D'Abrusco et al., 2007; Li et al., 2007; Banerji et al., 2008). Remitimos al lector a Ball et al. (2010) y Baron et al. (2019) para una revisión completa y extensa de las técnicas de aprendizaje automático pre-deep learning aplicadas a la astronomía.

LA REVOLUCIÓN DEL APRENDIZAJE PROFUNDO O DEEP LEARNING

El aprendizaje profundo designa generalmente las técnicas de optimización basadas en gradientes de arquitecturas modulares de complejidad variable; es, por tanto, un subcampo de la disciplina más general del aprendizaje automático. En muchos aspectos, el aprendizaje profundo representa un cambio en la forma de abordar el análisis de datos.

El acceso a grandes conjuntos de datos junto a la disponibilidad de recursos informáticos lo suficientemente potentes, han permitido durante la última década pasar de un enfoque centrado en algoritmos y basado en características diseñadas manualmente a un enfoque de aprendizaje de características no supervisado y totalmente basado en datos. Esto implica que, en lugar de desarrollar algoritmos avanzados específicos de cada dominio para cada tarea, nos basamos en un algoritmo de optimización genérico para extraer las características más significativas en un bucle de entrenamiento end-to-end. Se trata de un nuevo enfoque de los datos en astrofísica y en la ciencia en general.

Desde mi punto de vista, y esto es evidentemente una visión subjetiva, el aporte principal del aprendizaje profundo a la ciencia ha sido la capacidad para

muestrear distribuciones de probabilidad de muy alta dimensionalidad, tarea que hasta ahora resultaba prohibitiva o directamente imposible. Esto tiene implicaciones profundas en la manera en la que se analizan los datos y se extrae información. Es el objetivo de esta reseña dar una breve descripción de esta transición en curso.

LA CLASIFICACIÓN: UNA HISTORIA DE ÉXITO

Un ejemplo paradigmático de cómo el aprendizaje profundo está cambiando el análisis científico es la clasificación de fuentes. Es un paso básico de procesamiento de primer orden en la mayoría de los grandes cartografiados pero resulta muy ilustrativo. La rápida penetración del aprendizaje profundo puede explicarse de forma natural porque se trata, posiblemente, de la aplicación «lista para usar» más sencilla. De hecho, el aprendizaje profundo comenzó a atraer la atención de la comunidad de visión por ordenador cuando las redes neuronales convolucionales ganaron por primera vez el concurso ImageNet de clasificación de imágenes (Krizhevsky et al., 2012).

Una de las primeras tareas que realizan los científicos cuando se enfrentan a un problema complejo es identificar objetos morfológicamente similares. En astronomía extragaláctica, la clasificación de objetos puede ser de distintos tipos. En el caso de las imágenes, las aplicaciones más comunes son la clasificación morfológica de galaxias, la separación estrella-galaxia y la detección de lentes gravitacionales fuertes.

En todas estas aplicaciones, el aprendizaje profundo se ha convertido en menos de una década en el método privilegiado para la clasificación de objetos en grandes conjuntos de datos. Catálogos en grandes cartografiados basados en aprendizaje profundo son cada vez más habituales y se usan de modo rutinario para el análisis científico. Esto se debe fundamentalmente a que las redes neuronales proporcionan a la vez un incremento significativo de la calidad de la clasificación a la vez que reducen el tiempo de cálculo.

Aunque es un caso muy específico, es un claro ejemplo de cómo el deep learning ha transformado un campo de investigación y actuado como acelerador de la investigación científica. Hace poco más de una

década no había una respuesta clara a cómo clasificar fuentes en la nueva generación de cartografiados como Euclid o LSST. Se sabía que se había llegado al límite de la ciencia ciudadana (Lintott et al., 2008). Por ejemplo, clasificar todas las galaxias de Euclid mediante ciencia ciudadana tomaría cerca de 100 años. Hoy en día, a pocos meses de la publicación de los primeros datos del telescopio espacial Euclid, la clasificación de cientos de millones de galaxias prácticamente de manera instantánea es posible gracias al aprendizaje profundo (Huertas-Company et al., 2015; Walmsley et al., 2022).

INFERENCIA BAYESIANA Y APRENDIZAJE PROFUNDO: ¿UN MATRIMONIO PERFECTO?

Dada su flexibilidad y la capacidad del aprendizaje profundo para muestrear distribuciones de probabilidad de alta dimensionalidad, su utilización en astrofísica para tareas más complejas y específicas es cada vez más habitual.

En los últimos años hemos asistido a un rápido desarrollo del denominado *simulation-based inference* (Cranmer et al., 2019), una aproximación que fusiona la inferencia bayesiana, tan importante en astrofísica durante los últimos veinte años, con el aprendizaje profundo. La inferencia bayesiana, aunque extremadamente útil para constreñir propiedades físicas, es de manera general muy costosa desde un punto de vista computacional. El muestreo tradicional con cadenas de Markov se torna impracticable en casos donde la dimensionalidad del espacio a explorar es grande. Por otro lado, se requiere de manera general una aproximación gaussiana a la distribución de verosimilitud (*likelihood*), lo que no siempre es una buena aproximación en casos altamente no lineales.

El aprendizaje profundo permite sortear de manera muy eficaz estos escollos, abriendo la posibilidad de realizar inferencias en espacios de muy alta dimensionalidad (¡incluido el espacio de las imágenes!) y relajando la aproximación de gaussianidad. Sin embargo, se requiere un ingrediente indispensable: una simulación fidedigna. Es decir, si uno es capaz de simular el proceso físico en cuestión hasta el nivel más bajo de la observación incluyendo ruido y características de los detectores, el aprendizaje profundo abre las puertas a la inferencia bayesiana en situaciones sin precedentes.

«Se sabía que se había
llegado al límite de
la ciencia ciudadana.
Por ejemplo, clasificar
todas las galaxias de
Euclid mediante ciencia
ciudadana tomaría cerca
de 100 años.

Hoy en día, a pocos
meses de la publicación
de los primeros datos del
telescopio espacial Euclid,
la clasificación de cientos
de millones de galaxias
prácticamente de manera
instantánea es posible
gracias al aprendizaje
profundo.»

Este matrimonio entre la inferencia bayesiana y el aprendizaje profundo ha permitido aplicaciones que hasta ahora eran imposibles, como por ejemplo la inferencia de parámetros cosmológicos a partir de las imágenes directamente (Jeffrey et al., 2021) o de una única galaxia (Villaescusa-Navarro et al., 2022) o la estimación de la historia de fusiones de una galaxia a partir de su cinemática (Pillepich et al., 2024).

Quedan bastantes escollos fundamentales que resolver antes de poder aplicar este tipo de análisis a cualquier conjunto de datos. El más importante es probablemente saber cómo identificar situaciones en las que las simulaciones son casi perfectas pero lo suficientemente diferentes como para introducir sesgos (Aurrekoetxea et al., 2023; Dayal et al., 2023). Por otro lado, se requiere de manera general un conjunto de simulaciones diferentes para cada situación o tipo de dato, lo que, dependiendo de la situación, puede ser un problema en cuanto a tiempo de cómputo.

Sin embargo, mi opinión es que esta manera de analizar datos se va a convertir en cada vez más habitual en los próximos años.

¿HACIA UNA IA FUNDACIONAL?

Como se ha mencionado en los apartados anteriores, uno de los mayores problemas de las aplicaciones de IA es que, de manera general, se requiere un entrenamiento específico para cada situación. Esto implica ya sea un etiquetado o una simulación. Las características diferentes de cada conjunto de datos/instrumentos combinado con el carácter altamente no lineal de las redes neuronales acentúan este problema. Por lo tanto, en la última década hemos visto aparecer un gran número de trabajos que desarrollan o entrenan modelos de IA específicos para sus necesidades y que, por lo tanto, son de difícil exportación. Sin contar que, de manera general, la proporción de datos con etiquetas es pequeña y/o sesgada.

Para hacer frente a estas limitaciones ha surgido en los últimos años, especialmente en el ámbito privado, el concepto de modelo fundacional. Se trataría de un modelo de IA capaz de generalizar lo suficiente como para no solo poderse aplicar a diferentes conjuntos de datos, sino también para diferentes tareas. El ejemplo más exitoso de este tipo de modelo es sin duda ChatGPT y los modelos de lenguaje en general.

¿Cómo se entrena esta IA? La idea es que estos modelos no se entrenan para una tarea específica, sino que se entrenan para entender la estructura de los datos. Por ejemplo, los modelos de lenguaje se entrenan para predecir la palabra siguiente de un texto dado un contexto. Esto tiene al menos una ventaja fundamental y es que se elimina la necesidad de etiquetas y, por lo tanto, se puede entrenar con todos los datos disponibles. De esta manera se consiguen hacer modelos más robustos, que generalicen mejor y que puedan efectuar múltiples tareas.

Los ejemplos en astrofísica son todavía bastante limitados (Huertas-Company et al., 2023), pero es probablemente una cuestión de tiempo. La astrofísica es un campo ideal para este tipo de aprendizaje dada la gran cantidad de datos diversos y generalmente de uso público sin restricciones éticas. Iniciativas como el MultiModalUniverse (MMU) están construyendo enormes bases de datos con datos astronómicos especialmente construidas para el entrenamiento de modelos fundacionales. Esto es un claro ejemplo de un cambio de tendencia. Está por ver dónde nos lleva y qué otras sorpresas nos esperan en este cambio en plena ebullición y que progresa a una velocidad vertiginosa.

REFERENCIAS

- Andreon S., Gargiulo G., Longo G., Tagliaferri R., Capuano N., 2000, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 319, 700
- Angeloudi E., Falcón-Barroso J., Huertas-Company M., Sarmiento R., Pillepich A., Walo-Martín D., Eisert L., 2023, , 523, 5408
- Angeloudi E., Falcón-Barroso J., Huertas-Company M., Boecker A., Sarmiento R., Eisert L., Pillepich A., 2024, *Nature Astronomy*, 8, 1310
- Ball N. M., Brunner R. J., 2010, *International Journal of Modern Physics D*, 19, 1049
- Ball N. M., Loveday J., Fukugita M., Nakamura O., Okamura S., Brinkmann J., Brunner R. J., 2004, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 348, 1038
- Ball N. M., Brunner R. J., Myers A. D., Tchong D., 2006, *The Astrophysical Journal*, 650, 497
- Banerji M., Abdalla F. B., Lahav O., Lin H., 2008, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 386, 1219
- Baron D., 2019, Technical report, Machine Learning in Astronomy: a practical overview, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019arXiv190407248B>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019arXiv190407248B>
- Bazell D., Peng Y., 1998, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 116, 47
- Bundy K., et al., 2015, *The Astrophysical Journal*, 798, 7
- Cohen S. H., Windhorst R. A., Odewahn S. C., Chiarzenza C. A., Driver S. P., 2003, *The Astronomical Journal*, 125, 1762
- Cranmer K., Brehmer J., Louppe G., 2019, Technical report, The frontier of simulation-based inference, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019arXiv191101429C>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019arXiv191101429C>
- D'Abrusco R., Staiano A., Longo G., Brescia M., Paolillo M., De Filippis E., Tagliaferri R., 2007, *The Astrophysical Journal*, 663, 752
- de Santi N. S. M., et al., 2023, arXiv e-prints, p. arXiv:2310.15234
- Gao D., Zhang Y.-X., Zhao Y.-H., 2008, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 386, 1417
- Huertas-Company M., Lanusse F., 2023, , 40, e001
- Huertas-Company M., Rouan D., Tasca L., Soucail G., Le Fèvre O., 2008, , 478, 971
- Huertas-Company M., Aguerri J. A. L., Bernardi M., Mei S., Sánchez Almeida J., 2011, , 525, A157
- Huertas-Company M., et al., 2015, , 221, 8
- Huertas-Company M., Sarmiento R., Knapen J. H., 2023, *RAS Techniques and Instruments*, 2, 441
- Ivezić Z., et al., 2019, *The Astrophysical Journal*, 873, 111
- Jeffrey N., Alsing J., Lanusse F., 2021, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 501, 954
- Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E., 2012, in *Advances in Neural Information Processing Systems*. Curran Associates, Inc., <https://papers.nips.cc/paper/2012/hash/c399862d3b9d6b-76c8436e924a68c45b-Abstract.html>
- Lahav O., et al., 1995, *Science*, 267, 859
- Lahav O., Naim A., Sodré Jr. L., Storrie-Lombardi M. C., 1996, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 283, 207
- Laureijs R., et al., 2011, Technical report, Euclid Definition Study Report, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011arXiv1110.3193L>. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011arXiv1110.3193L>
- Li L.-L., Zhang Y.-X., Zhao Y.-H., Yang D.-W., 2007, *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 7, 448
- Lintott C. J., et al., 2008, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 389, 1179
- Madgwick D. S., 2003, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 338, 197
- Miller A. S., Coe M. J., 1996, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 279, 293
- Naim A., Ratnatunga K. U., Griffiths R. E., 1997, arXiv e-prints, pp astro-ph/9704012
- Odewahn S. C., Stockwell E. B., Pennington R. L., Humphreys R. M., Zumach W. A., 1992, *The Astronomical Journal*, 103, 318
- Odewahn S. C., Windhorst R. A., Driver S. P., Keel W. C., 1996, *The Astrophysical Journal*, 472, L13
- Pillepich A., et al., 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473, 4077
- Qin D.-M., Guo P., Hu Z.-Y., Zhao Y.-H., 2003, *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 3, 277
- Storrie-Lombardi M. C., Lahav O., Sodre Jr. L., Storrie-Lombardi L. J., 1992, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 259, 8P
- Villaescusa-Navarro F., et al., 2021, *The Astrophysical Journal*, 915, 71
- Villaescusa-Navarro F., et al., 2022
- Walmsley M., et al., 2022, , 509, 3966
- Weir N., Fayyad U. M., Djorgovski S., 1995, *The Astronomical Journal*, 109, 2401
- White R. L., et al., 2000, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 126, 133

Las estrellas masivas desempeñan un papel crucial en nuestra Galaxia y algunas se desplazan a altas velocidades respecto a su entorno, conocidas como estrellas fugitivas. Gracias a la precisión de los datos de *Gaia*, hemos identificado 175 estrellas O y Be fugitivas, la mitad de ellas nuevos descubrimientos, cruzando estos datos con catálogos de estrellas masivas. Nuestro método detecta tanto estrellas fugitivas como "caminantes" sin definir un umbral en velocidad. Este trabajo, primer artículo de mi tesis, aporta una visión sobre los mecanismos de eyección estelar y ha sido galardonado con el Tercer Premio de "La Vanguardia de la Ciencia 2024".



Autora: Mar Carretero-Castrillo
Institut de Ciències del Cosmos (ICCUB),
Universitat de Barcelona (IEEC-UB)
mcarretero@fqa.ub.edu

ESTRELLAS MASIVAS Y FUGITIVAS

Las estrellas masivas, nacidas con $M > 8M_{\odot}$ e impulsadas por intensos vientos estelares, desempeñan un papel crucial en la formación del Universo. Son motores cósmicos que impulsan la evolución de las galaxias y la producción de elementos pesados. La mayoría de las estrellas masivas se encuentran en sistemas binarios, en los que las interacciones con sus compañeras influyen en gran medida en su evolución. Sin embargo, su escasez y corta vida dificultan la comprensión de su formación y evolución. A pesar de ello, son responsables de la mayor parte de la producción de energía de las galaxias [1].

Algunas estrellas masivas de tipo O y B son fugitivas, viajando a velocidades sorprendentemente altas, de hasta 200 km/s, en comparación con sus vecinas estelares. Estas estrellas ofrecen así una oportunidad única para estudiar estrellas masivas en distintos entornos galácticos. Respecto a su origen como fugitivas, se han propuesto dos escenarios: el escenario de eyección dinámica [2], en el que una estrella es expulsada dinámicamente de un cúmulo; y el escenario de supernova en un sistema binario [3], en el que la estrella compañera o todo el sistema binario gana velocidad tras la explosión de la supernova. También podría darse un proceso de aceleración en dos etapas que combine ambos escenarios [4]. Sin embargo, las contribuciones relativas de estos escenarios en la Galaxia siguen siendo inciertas.

Además, las estrellas masivas que albergan objetos compactos son de especial interés debido a su asociación con sistemas binarios de rayos X y rayos gamma. Estos sistemas binarios de alta energía presentan una emisión en múltiples longitudes de onda, desde radio hasta rayos gamma de muy alta energía. Sin embargo, la población de estas exóticas binarias de rayos gamma es escasa, con sólo nueve fuentes conocidas.

Curiosamente, algunos de estos sistemas binarios de alta energía son fugitivos, probablemente producto de explosiones de supernova. Por lo tanto, la caracterización precisa de las estrellas masivas fugitivas no sólo aborda cuestiones importantes en el campo de las estrellas masivas, sino que también contribuye a los estudios de población de fuentes de alta energía en nuestra Galaxia.

DE LAS ESTRELLAS FUGITIVAS DE LA GALAXIA

BÚSQUEDA DE FUGITIVAS CON GAIA

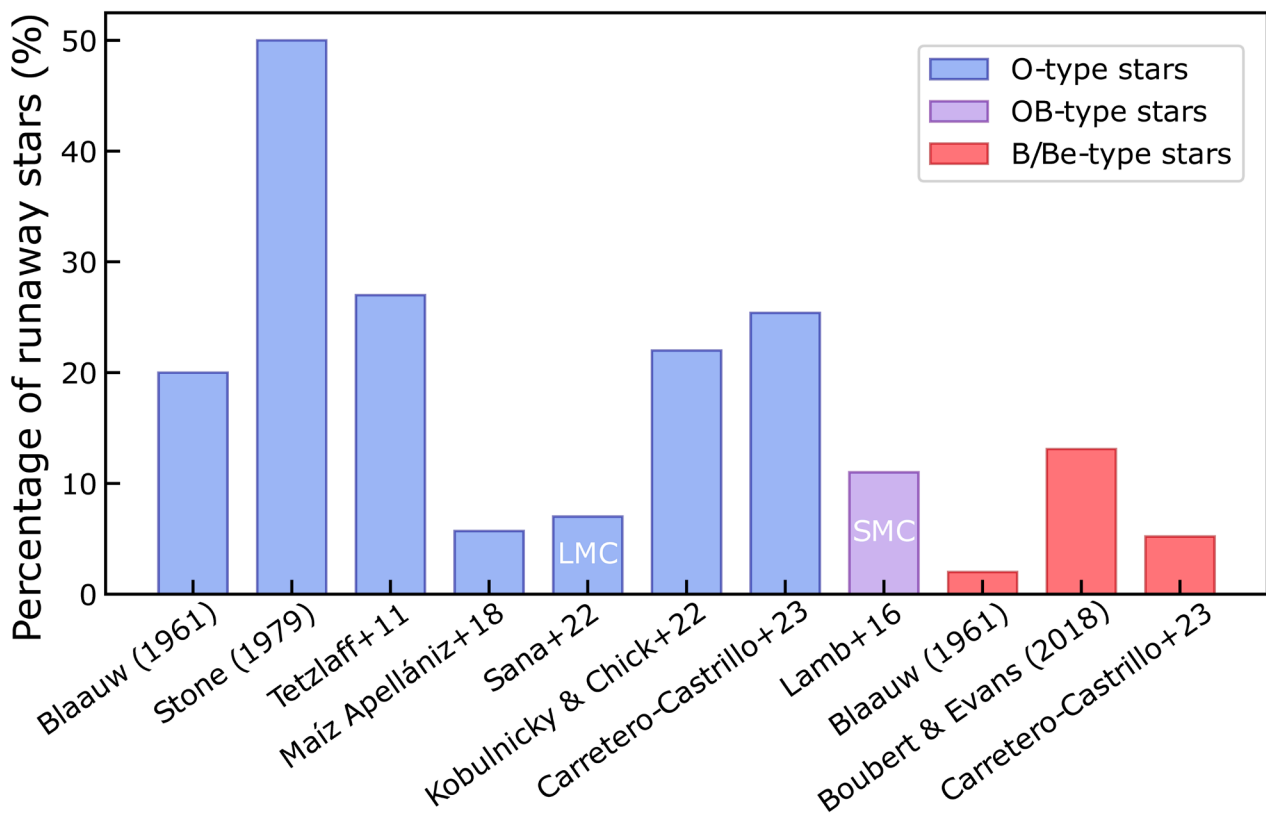
Los últimos datos de *Gaia* DR3 [5] ofrecen una oportunidad única para identificar estrellas fugitivas. La excepcional calidad de estos datos astrométricos hace posible poder calcular distancias y velocidades de estrellas con una precisión sin precedentes. Además, estudios previos sobre estrellas fugitivas encuentran una dispersión significativa en las fracciones de fugitivas, pues utilizan muestras, métodos y criterios diferentes, que no permiten una identificación unificada (ver Fig.1).

En el primer artículo de mi tesis, Carretero-Castrillo et al. 2023 [11], realizado en colaboración con mis supervisores Marc Ribó y Josep Maria Paredes, buscamos estrellas fugitivas en nuestra Galaxia

utilizando datos de *Gaia* DR3, y catálogos de estrellas masivas, con un método nuevo y autoconsistente de velocidad espacial en 2 dimensiones (2D). En particular, usamos el catálogo de estrellas O “Galactic O-star catalog” (GOSC) [14], y la base de datos de estrellas Be, “Be Star Spectra” (BeSS) Database [15], que cruzamos con los datos de *Gaia* DR3. Tras aplicar algunos filtros de calidad a los datos, acabamos construyendo el catálogo GOSC-*Gaia* DR3, con 417 estrellas tipo O, y el BeSS-*Gaia* DR3, con 1335 estrellas tipo Be.

Para identificar las estrellas fugitivas, primero calculamos distancias precisas de estrellas masivas aplicando una corrección para las paralajes de *Gaia* DR3 [16], y después velocidades, teniendo en

Figura 1. Histograma del porcentaje de estrellas fugitivas encontrados por diferentes trabajos en la Vía Láctea, y en el Large y el Small Magellanic Cloud, LMC y SMC, respectivamente. Referencias: [3], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13].



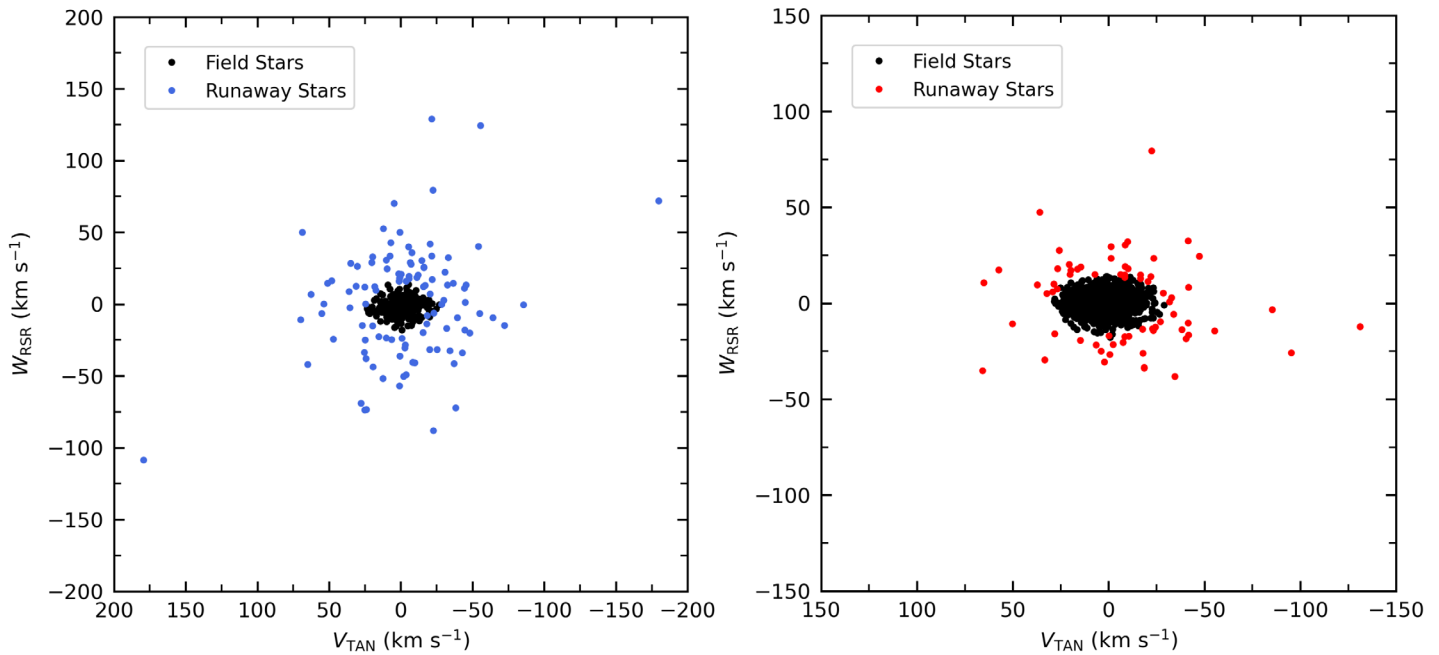


Figura 2. Espacio de velocidades en dos dimensiones usado en este trabajo para las estrellas GOSC-Gaia DR3 (izquierda) y el BeSS-Gaia DR3 (derecha). Las estrellas de campo se representan en negro y las estrellas fugitivas en azul y rojo, dependiendo del catálogo. Fuente: Carretero-Castrillo et al. (2023) [11].

cuenta una curva de rotación galáctica [17]. Finalmente, caracterizamos las estrellas basándonos en la significancia de sus velocidades 2D respecto a la curva de rotación. Este enfoque evita el uso de umbrales de velocidad, a diferencia de trabajos anteriores, y permite la identificación coherente de tanto de estrellas de movimiento lento (caminantes) como de estrellas fugitivas.

UNA NUEVA POBLACIÓN DE ESTRELLAS FUGITIVAS EN LA GALAXIA

Así, hemos identificado 106 estrellas fugitivas de tipo O, y 69 fugitivas de tipo Be, siendo la mitad de ellas descubiertas como fugitivas por primera vez. Estos números representan un 25,4% de estrellas fugitivas de tipo O y un 5,2% de estrellas de tipo Be en nuestros catálogos. Las estrellas fugitivas muestran altas dispersiones de velocidad de 20-40 km/s, mientras que las estrellas de campo, tienen dispersiones de 5-9 km/s, con las estrellas de tipo Be presentando mayor dispersión debido a la difusión de la velocidad galáctica en el disco.

La Fig. 2 muestra las distribuciones de velocidad 2D para las estrellas de los catálogos GOSC- y BeSS-Gaia DR3, incluyendo una distinción por colores entre estrellas fugitivas y de campo. Las estrellas de campo se agrupan en torno a (0,0), mientras que las fugitivas presentan velocidades más altas. En particular, las velocidades de las estrellas fugitivas O son mayores que las de las fugitivas Be. Asimismo, las menores desviaciones estándar en la componente perpendicular de la velocidad junto con las mayores incertidumbres en la tangencial, implican que se identifican más fugitivas en la componente perpendicular.

En la Fig. 3 se muestran las posiciones de las estrellas fugitivas O y Be (círculos amarillos) en coordenadas galácticas (l, b), junto con el mapa de la Vía Láctea de Gaia DR3 en el fondo. Las flechas muestran las direcciones y sentidos de los movimientos propios de estas estrellas, escaladas considerando un tiempo de 3 Myr en el futuro. Las estrellas fugitivas presentan 2-3 veces más dispersión

en b que las estrellas de campo (no mostradas en esta figura), lo que es de esperar dado que han sido expulsadas de sus lugares de nacimiento durante su formación como fugitivas.

También clasificamos las fugitivas en distintos intervalos de tipos sub-espectrales y encontramos que el porcentaje de fugitivas disminuye a medida que nos desplazamos a tipos espectrales más tardíos, como se puede apreciar en la Fig. 4. Los porcentajes más altos y las velocidades más altas obtenidas para las estrellas de tipo O en comparación con las estrellas de tipo Be favorecen el dominio del escenario de las eyecciones dinámicas en cúmulos sobre el de las de supernova en sistemas binarios.

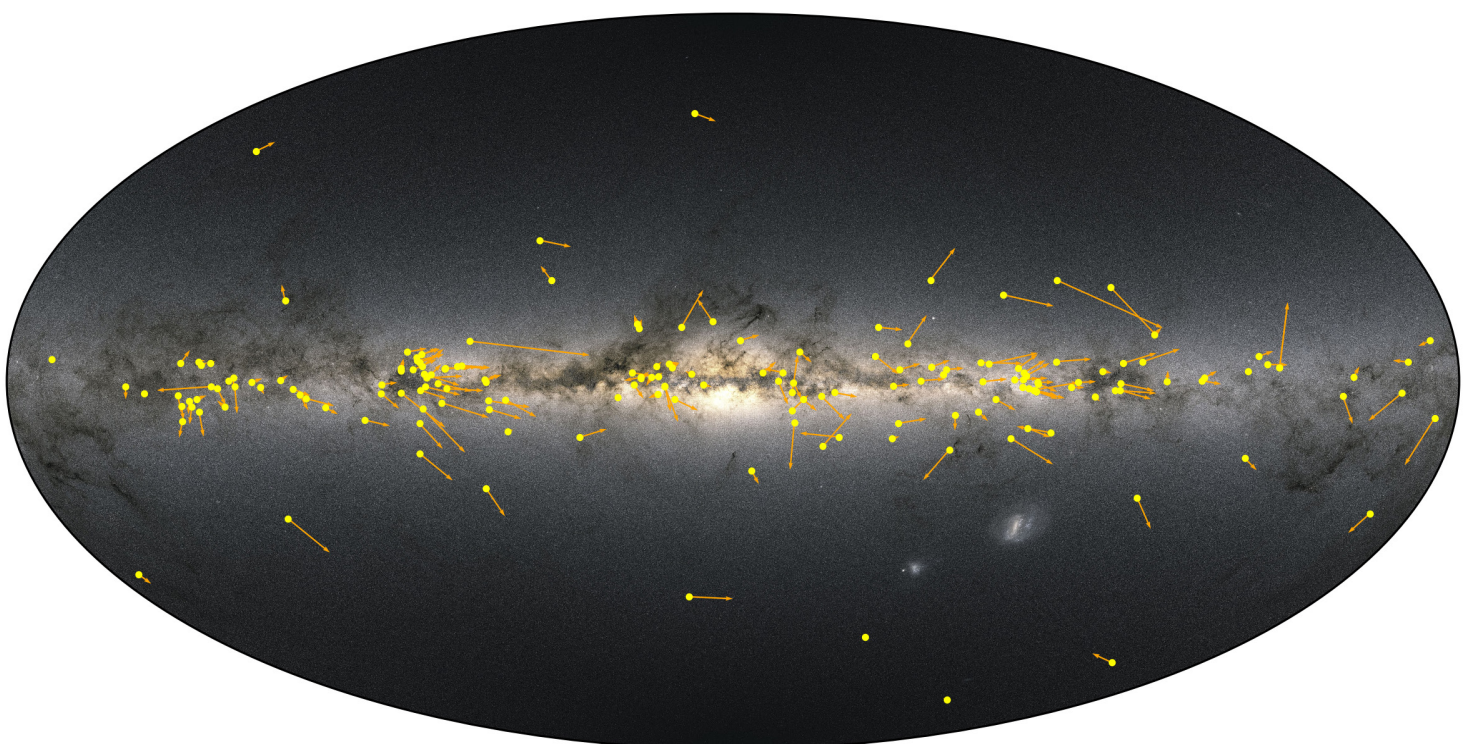
¿Y QUÉ MÁS VENDRÁ?

Dada su alta velocidad, las estrellas fugitivas nos ofrecen una oportunidad única de estudiarlas a través de diferentes ambientes en la Galaxia. Además, si son masivas y fugitivas, éstas interactúan especialmente con el medio interestelar formando choques de proa, con-

ocidos como “bow shocks” en inglés, donde pueden ocurrir fenómenos de aceleración de partículas a velocidades relativistas. Finalmente, en el escenario supernova en un sistema binario, se pueden crear sistemas binarios fugitivos que contengan objetos compactos, siendo éstos muy peculiares e interesantes.

Para investigar los choques de proa de nuestras estrellas fugitivas, hemos colaborado con la experta en radioastronomía, Paula Benaglia (Instituto Argentino de Radioastronomía). A través de los datos en infrarrojo de WISE [18] y de *Gaia* DR3, hemos obtenido nuevas identificaciones de estas estructuras alrededor de nuestras fugitivas. Por otro lado, para buscar sistemas binarios de alta energía, estamos estudiando y caracterizando el catálogo de fugitivas en diferentes longitudes de onda (radio, rayos X, rayos gamma), incluyendo además información sobre binariedad. Esta búsqueda nos podría ayudar a encontrar nuevos sistemas binarios de rayos gamma en nuestra Galaxia, y servir para la futura explotación científica del Cherenkov Telescope Array Observatory (CTAO).

Figura 3. Posiciones (círculos amarillos) y direcciones y sentidos de los movimientos propios (flechas naranjas) de las estrellas fugitivas descubiertas en este trabajo con el mapa del cielo Gaia DR3 de la Vía Láctea. Crédito del mapa del cielo: ESA/Gaia/DPAC.



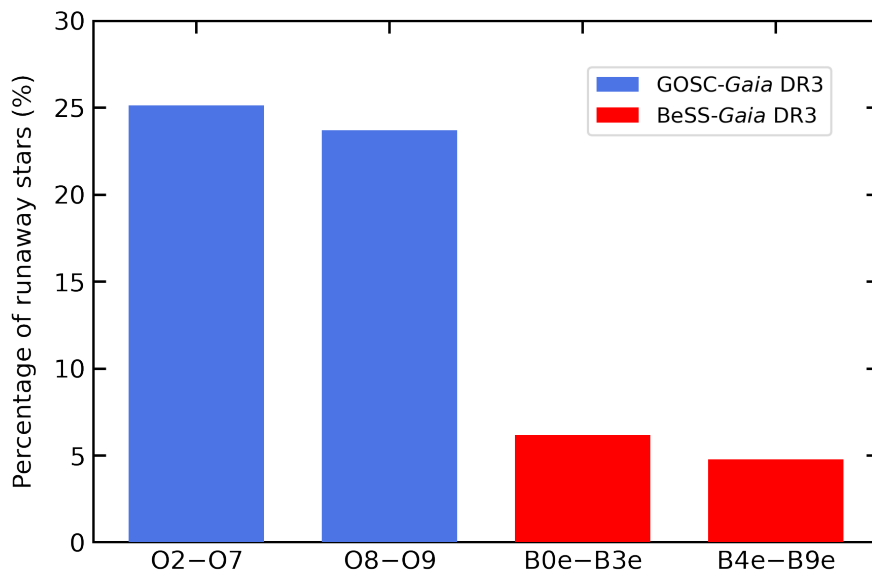


Figura 4. Porcentaje de estrellas fugitivas en función del tipo espectral. Los colores azul y rojo corresponden a las estrellas GOSC- y BeSS-Gaia DR3, respectivamente. Fuente: Carretero-Castrillo et al. (2023) [11].

Vale la pena destacar, que estos son sólo algunos ejemplos de casos científicos que se pueden explotar a través de las estrellas fugitivas, tanto desde el punto de vista teórico como observacional. Por ello, hemos publicado en VizieR los catálogos de las estrellas fugitivas que hemos encontrado. De esta forma, están accesibles a la comunidad científica, para maximizar así la explotación de los resultados científicos que se puedan obtener de estas estrellas.

SOBRE EL PREMIO “VANGUARDIA DE LA CIENCIA 2024”

El premio “[Vanguardia de la Ciencia 2024](#)”, organizado por La Vanguardia y la Fundació Catalunya La Pedrera, está dirigido a investigaciones lideradas por mujeres durante 2023. Este premio tiene como objetivo visibilizar la investigación de excelencia que se realiza en España y contribuir a reducir la brecha de género en el ámbito de la ciencia.

[Recibir este tercer premio](#) representa mucho más que el reconocimiento a una investigación sobre estrellas fugitivas y *Gaia*. Es una oportunidad tanto para visibilizar la investigación en astrofísica y sus contribuciones en el contexto científico español, como para enfatizar la importancia de iniciativas que

apoyan la igualdad y la diversidad de género en ciencia. En particular, la visibilidad otorgada por un medio de amplia difusión como La Vanguardia añade mucho valor a este premio, promoviendo la presencia de referentes científicas en un ámbito donde aún estamos poco representadas.

Una de las lecciones más valiosas que he aprendido durante este proceso ha sido reconocer la importancia que tiene el entorno profesional en las carreras de las científicas. Gracias al respaldo de mis supervisores de tesis, la comisión de Diversidad, Equidad e Inclusión (DEI) del Instituto de Ciències del Cosmos (ICCUB), y el programa de mentoría de la SEA, encontré el apoyo necesario para optar a este premio. Descubrir que cuento con tanto apoyo ha sido realmente la parte más importante de todo este proceso. Esta experiencia me ha hecho ver lo fundamental que es tener un entorno profesional positivo para que las carreras de las mujeres científicas prosperen y se construya una ciencia más inclusiva y diversa.

Así que ojalá que estas últimas líneas sirvan para recordarnos la importancia que pueden llegar a tener las diferentes iniciativas y comités que fomenten la Diversidad, la Equidad y la Inclusión en ciencia.

REFERENCIAS

- [1] Marchant, P. and Bodensteiner, J. (2024) The Evolution of Massive Binary Stars. *ARA&A*, 62 (1), 21–61.
- [2] Poveda, A., Ruiz, J. and Allen, C. (1967) Run-away Stars as the Result of the Gravitational Collapse of Proto-stellar Clusters. *Boletín de los Observatorios Tonantzintla y Tacubaya*, 4, 86–90.
- [3] Blaauw, A. (1961) On the origin of the O- and B-type stars with high velocities (the “run-away” stars), and some related problems. *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, 15, 265.
- [4] Pflamm-Altenburg, J. and Kroupa, P. (2010) The two-step ejection of massive stars and the issue of their formation in isolation. *MNRAS*, 404(3), 1564–1568.
- [5] *Gaia* Collaboration (Vallenari, A., et al.) 2023a, *A&A*, 674, A1.
- [6] Stone, R. C. (1979) Kinematics, close binary evolution, and ages of the O stars. *ApJ*, 232, 520–530.
- [7] Tetzlaff, N., Neuhäuser, R. and Hohle, M. M. (2011) A catalogue of young runaway Hipparcos stars within 3 kpc from the Sun. *MNRAS*, 410 (1), 190–200.
- [8] Maíz Apellániz, J., Pantaleoni González, M., Barbá, R. H., et al. (2018) Search for Galactic runaway stars using *Gaia* Data Release 1 and HIPPARCOS proper motions.
- [9] Sana, H., Ramírez-Agudelo, O. H., Hénault-Brunet, V., et al. (2022) The VLT-FLAMES Tarantula Survey. Observational evidence for two distinct populations of massive runaway stars in 30 Doradus. *A&A*, 668, L5.
- [10] Kobulnicky, H. A. and Chick, W. T. (2022) Kinematics of the Central Stars Powering Bowshock Nebulae and the Large Multiplicity Fraction of Runaway OB Stars. *AJ*, 164(3), 86.
- [11] Carretero-Castrillo, M., Ribó, M. and Paredes, J. M. (2023b) Galactic runaway O and Be stars found using *Gaia* DR3. *A&A*, 679, A109.
- [12] Lamb, J. B., Oey, M. S., Segura-Cox, D. M., et al. (2016) The Runaways and Isolated O-Type Star Spectroscopic Survey of the SMC (RIOTS4). *ApJ*, 817(2), 113.
- [13] Boubert, D. and Evans, N. W. (2018) On the kinematics of a runaway Be star population. *MNRAS*, 477(4), 5261–5278.
- [14] Maíz Apellániz, J., Sota, A., Morrell, N. I., et al. (2013) First whole-sky results from the Galactic O-Star Spectroscopic Survey. In *Massive Stars: From alpha to Omega*, p. 198.
- [15] Neiner, C., de Batz, B., Cochard, F., et al. (2011) The Be Star Spectra (BeSS) Database. *AJ*, 142 (5), 149.
- [16] Maíz Apellániz, J. (2022) An estimation of the *Gaia* EDR3 parallax bias from stellar clusters and Magellanic Clouds data. *A&A*, 657, A130.
- [17] Reid, M. J., Menten, K. M., Brunthaler, A., et al. (2019) Trigonometric Parallaxes of High-mass Star-forming Regions: Our View of the Milky Way. *ApJ*, 885(2), 131.
- [18] Wright, E. L., Eisenhardt, P. R. M., Mainzer, A. K., et al. (2010) The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance. *AJ*, 140(6), 1868–1881.

ARTÍCULOS LA VANGUARDIA RELACIONADOS CON EL PREMIO

- <https://www.lavanguardia.com/vanguardia-de-la-ciencia/20240922/9955058/vuelve-premio-vanguardia-ciencia.html>
- <https://www.lavanguardia.com/vanguardia-de-la-ciencia/20240922/9946901/buscando-estrellas-fugitivas-lactea.html>
- <https://www.lavanguardia.com/ciencia/20241019/10029898/busco-estrellas-fugitivas-desafian-fisica-conocemos.html>
- <https://www.lavanguardia.com/ciencia/20241027/10050088/investigacion-cancer-infantil-gana-premio-vanguardia-ciencia.html>

AGRADECIMIENTOS

Este artículo científico, con el consecuente premio de La Vanguardia, no hubiera sido posible sin mis supervisores de tesis, Marc Ribó y Josep Maria Paredes, quienes me guían y apoyan en el camino científico, y más allá.

El modelo cosmológico estándar, también conocido como lambda materia oscura fría (Λ CDM), debido a sus componentes principales: la materia oscura fría y la energía oscura en forma de constante cosmológica (Λ), es altamente exitoso en la explicación de una amplia gama de observaciones del universo, como las fluctuaciones de temperatura del fondo cósmico de microondas, las oscilaciones acústicas bariónicas, la abundancia de elementos ligeros como el hidrógeno y el helio, y el patrón observado de la agrupación de galaxias. A pesar de estos éxitos, surgen varias discrepancias dentro de este marco teórico. En este artículo presentaré varias de estas tensiones cosmológicas que llevan intrigando a la comunidad científica y explicaré cómo desde la cosmología se están proponiendo nuevos modelos para solucionar estas anomalías y conseguir explicar con precisión las observaciones que tenemos del universo.



Helena García Escudero
Universidad de California, Irvine (UCI)
garciaeh@uci.edu

EL MODELO ESTÁNDAR DE COSMOLOGÍA, O Λ CDM

La cosmología es el estudio científico riguroso de las estructuras del universo y sus leyes fundamentales, utilizando técnicas de observación avanzadas y modelos teóricos para desentrañar los orígenes, la evolución y el destino final del cosmos. Este campo aborda preguntas profundas, impulsando nuestra comprensión de los principios físicos relacionados con la historia del universo. En el centro de esta exploración se encuentra el modelo cosmológico estándar, Λ CDM, que explica con éxito una gran diversidad de observaciones como las fluctuaciones de temperatura del fondo cósmico de microondas, la distribución de estructuras a gran escala y la abundancia primordial de elementos ligeros. A pesar de estos logros, surgen varias discrepancias dentro de este marco teórico. Empezaré explicando dos tensiones que llevan existiendo varias décadas, y más adelante me centraré en otras que han aparecido más recientemente.

LA TENSION DE HUBBLE

La tensión de Hubble es una discrepancia significativa entre la medición localmente independiente del modelo de la constante de Hubble (H_0), basada en variables cefeidas y supernovas de tipo Ia, y el valor más bajo dependiente del modelo inferido a partir de observaciones del fondo cósmico de microondas, asumiendo el modelo Λ CDM. Esta tensión ha persistido e incluso ha aumentado, a pesar del creciente volumen y precisión de los datos, alcanzando un nivel preocupante en la actualidad. En la Figura 1 se puede observar cómo a lo largo de los años las barras de error asociadas al cálculo de esta constante se han ido reduciendo progresivamente, manteniendo la diferencia en el valor medio utilizando diferentes métodos. Existen modelos que modifican la física del universo como se explica bajo el modelo estándar de cosmología y permiten aliviar significativamente esta tensión. En la Figura 2 presento los resultados de un análisis estadístico en el que comparamos cómo algunos modelos candidatos a resolver este problema alivian la tensión a la vez que se ajustan a los datos con tan buena precisión como el modelo estándar de cosmología. La línea horizontal azul muestra el límite estadístico que delimita si los modelos resuelven la tensión mejor que el modelo estándar de física. Demostramos que cuatro extensiones al modelo estándar de física: la existencia de energía oscura temprana (EDE), la existencia de campos magnéticos primordiales (PMF), una energía

ALLÁ DEL MODELO COSMOLÓGICO ESTÁNDAR

Figura 1. Evolución en las últimas décadas de las mediciones del valor de la expansión actual del universo, o constante de Hubble, mediante dos métodos diferentes: utilizando variables cefeidas y supernovas de tipo Ia (en rojo), y utilizando el fondo cósmico de microondas, asumiendo el modelo Λ CDM (en azul). Figura tomada del artículo [7].

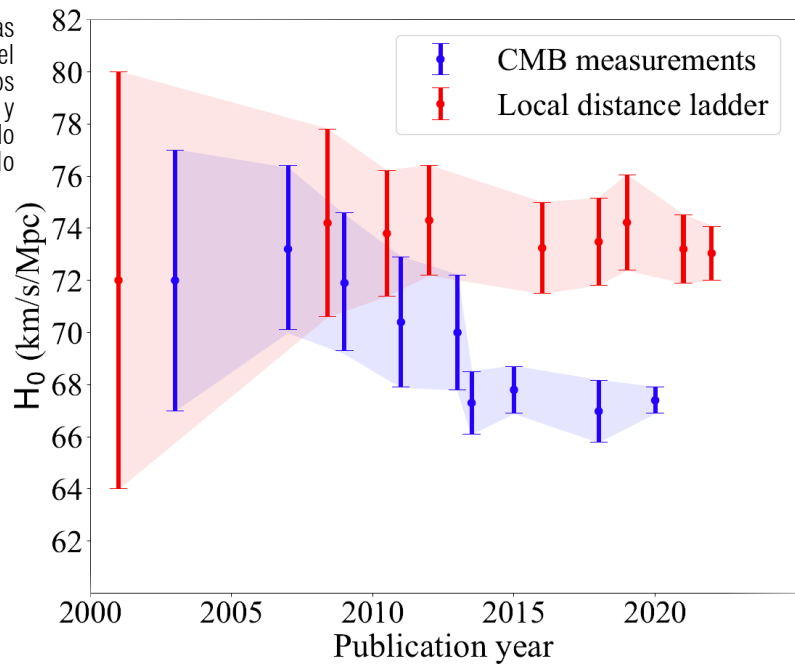


Figura 2: La figura muestra los valores del test estadístico, criterio de información de akaike (AIC) de los modelos candidatos considerados con respecto a Λ CDM: de izquierda a derecha: densidad de energía oscura variable (ω CDM), la existencia de un incremento en el número de especies relativistas en nuestro universo (Λ CDM+ N_{eff}), masa de neutrinos no trivial (Σm_ν), curvatura no nula (Ω_k), existencia de campos magnéticos primordiales (PMF), neutrinos auto-interactuantes (SI_ν) y energía oscura temprana (EDE), para aliviar la tensión de H_0 . Utilizando los datos base del fondo cósmico de microondas (barras rojas), combinados con las oscilaciones acústicas bariónicas (barras verdes) y combinados con observaciones de supernovas (barras azules). Las barras azules son las que combinan todas las observaciones cosmológicas de nuestro universo colectivamente, por ello son las que tomamos como referencia para las conclusiones finales de nuestro estudio. La línea horizontal es el umbral de preferencia más fuerte en la escala estadística de Jeffrey. Los cuatro modelos que alivian esta tensión mejor que el modelo estándar son ω CDM, Λ CDM+ N_{eff} , PMF y EDE. Figura tomada del artículo [2].

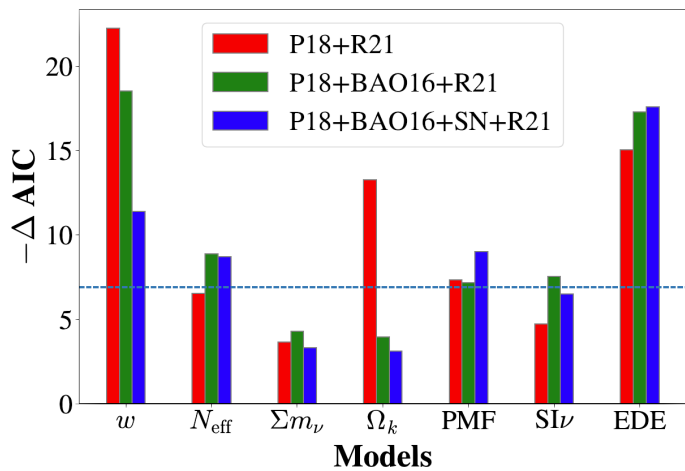
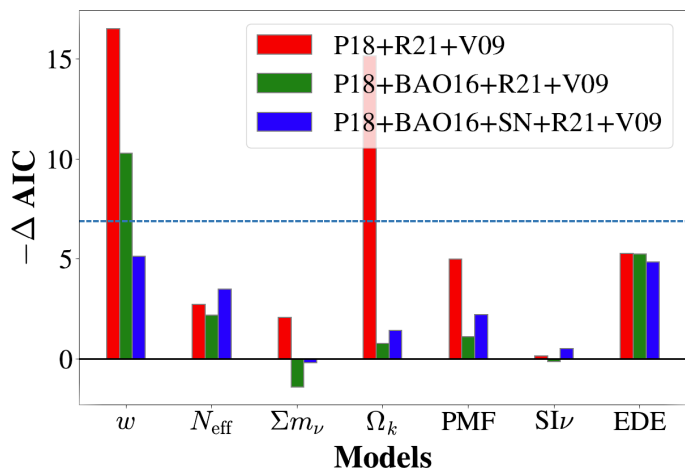


Figura 3. La figura muestra los mismos resultados que la figura 2, pero combinando las tensiones H_0 y S_8 simultáneamente. En esta ocasión, se puede observar cómo ningún modelo supera la barra horizontal azul cuando se combinan todas las observaciones cosmológicas de nuestro universo colectivamente (barras azules). Figura tomada del artículo [2].



oscura variable (ω CDM) o la existencia de un incremento en el número de especies relativistas en nuestro universo (Λ CDM + N_{eff}) fueron los modelos ganadores. Dicho de otra forma, estos modelos alivian la tensión de Hubble a la vez que explican las observaciones de nuestro universo mejor que Λ CDM [2]. No obstante, para obtener este resultado solo consideramos la tensión de Hubble, pero no podemos aislar este problema olvidándonos de otras anomalías como la discrepancia en la amplitud de las fluctuaciones de densidad de la materia en el universo.

LA TENSION DE S_8

El parámetro cosmológico S_8 cuantifica la amplitud o tasa de crecimiento de las estructuras en el universo a una escala de 8 Mpc. La tensión de S_8 surge de discrepancias entre las predicciones del modelo cosmológico estándar y las observaciones de las estructuras a gran escala del universo, como los cúmulos de galaxias. En este análisis incluimos ambas tensiones de manera simultánea y planteamos la misma cuestión: ¿existe algún modelo que se ajuste a los datos tan bien como el modelo estándar de física mientras resuelva ambas discrepancias? Los resultados no fueron tan satisfactorios, como se puede comprobar en la figura 3. No existe ningún modelo a día de hoy, de los que analizamos en este estudio, que resuelva ambas tensiones y se ajuste a los datos como el modelo estándar de cosmología. Este resultado no debe eliminar la esperanza; hemos identificado modelos que resuelven algunos problemas que el modelo estándar de cosmología no es capaz de explicar y conocemos algunas de las propiedades que debe tener la solución que alivie estas tensiones [2]. Nuevas misiones que están actualmente operativas o empezarán a tomar datos en el futuro próximo nos van a permitir seguir investigando estas cuestiones, como por ejemplo Instrumento Espectroscópico de Energía Oscura (DESI), o el satélite europeo Euclid [9].

ANOMALÍAS COSMOLÓGICAS RECIENTES: DENSIDAD DE ENERGÍA OSCURA VARIABLE O NEUTRINOS CON MASA "NEGATIVA"

Más recientemente, en abril de 2024, los análisis y mediciones del primer conjunto de datos de la colaboración de las oscilaciones acústicas bariónicas de DESI, junto con observaciones del fondo cósmico de microondas y supernovas, mostraron que sus datos se ajustaban más favorablemente a un modelo

en el que densidad de la energía oscura varía con el tiempo, presentando una nueva discrepancia con el modelo cosmológico estándar donde la energía oscura es constante. Además, si se combinan los datos de las colaboraciones de Planck y DESI, existe una preferencia por una "masa de neutrinos negativa", un resultado no físico que podría estar asociado con un exceso del efecto de lente gravitacional del fondo cósmico de microondas en comparación con las predicciones del modelo Λ CDM, pero que requiere más investigación [4,5,6].

Actualmente, estamos analizando el origen de esta anomalía. Al combinar los datos del fondo cósmico de microondas con las oscilaciones acústicas bariónicas y supernovas, y ajustando los datos a curvas Gaussianas la media de todas ellas predice que las masas de los neutrinos se sitúan en valores negativos. Sin embargo, mantengamos la calma, ya que estos efectos pueden explicarse por diversos factores. En primer lugar, los análisis del fondo cósmico de microondas de la colaboración Planck presentan un exceso del efecto de lente gravitacional, una discrepancia con la predicción del modelo estándar de cosmología. Varios reanálisis de este conjunto de datos corrigen este problema, y cuando los incluimos en nuestro análisis, la masa de los neutrinos adquiere valores más positivos. En segundo lugar, hay varios puntos asociados a las épocas del universo correspondientes a desplazamientos al rojo o redshift ($z=0.5$ y 0.7) en los que los datos proporcionados por DESI presentan discrepancias con respecto al modelo estándar de física y han sido señalados por varios estudios como objeto de fluctuaciones estadísticas [3,8]. Estos datos pueden contribuir a las predicciones de masas "negativas" de los neutrinos. Por otro lado, si consideramos modelos más allá del modelo cosmológico estándar, existen varios escenarios que podrían relajar el límite cosmológico sobre la masa de los neutrinos, aliviando esta anomalía. Uno de ellos es precisamente la energía oscura dinámica no constante, que los datos de DESI apoyan. Si se permite que la ecuación de estado de la energía oscura varíe, en combinación con la masa de los neutrinos, entonces los límites en la masa de los neutrinos se relajarían hasta valores positivos [3,8]. Existen otros escenarios cosmológicos donde el límite cosmológico de la masa de los neutrinos podría ser relajado o completamente evadido, algunos de los cuales están conectados a modelos relevantes de física de partículas. Estos inclu-

yen universos con temperaturas de calentamiento inferiores a las habituales, la desintegración de neutrinos, interacciones de neutrinos a larga distancia o transiciones de fase tardías [1,3,6]. La motivación para este tipo de escenarios es actualmente débil, pero si las futuras misiones cosmológicas no detectan la masa de los neutrinos, podríamos estar viendo el primer indicio de una propiedad no estándar de los neutrinos.

Por último, cabe destacar que el orden de este problema no es comparable con las otras dos tensiones mencionadas anteriormente, ya que se encuentra por debajo del nivel de 2σ . Aunque requiere atención, esperamos que esta anomalía desaparezca cuando se corrijan los efectos anómalos mencionados en esta sección con la publicación de nuevos datos de mayor precisión.

¿QUÉ RESULTADOS PODEMOS ESPERAR EN EL FUTURO DE ESTAS TENSIONES COSMOLOGICAS?

Los próximos años van a ser muy emocionantes en el campo de investigación de las tensiones cosmológicas. Existen varias misiones y experimentos programados para tomar medidas y publicar más datos sobre nuestro universo. Por ejemplo, DESI ya ha recopilado tres veces más datos que los publicados en su primer paquete de resultados, y el satélite europeo Euclid, que recopilará las posiciones de aún más galaxias, está completamente operativo y comenzará a recolectar datos cosmológicos muy pronto [9]. Se espera detectar la masa de los neutrinos a partir de una combinación de experimentos de DESI, Euclid y fondo cósmico de microondas dentro de 5 a 10 años. Si, a pesar de errores estadísticos y sistemáticos excepcionalmente pequeños, no se realiza ninguna detección, esto podría indicar la necesidad de una física más allá del modelo estándar de cosmología y física de partículas, posiblemente señalando una nueva propiedad no identificada de los neutrinos. Sin duda, los avances en cosmología y la física de neutrinos en los próximos años prometen revolucionar nuestra comprensión del universo y desvelar nuevos horizontes en la física fundamental.

NOTA

¹ El "número efectivo de especies relativistas" se refiere a una medida en cosmología que cuantifica la cantidad de partículas que se comportan como relativistas en el universo temprano. El número

efectivo de especies relativistas hoy es aproximadamente 3, correspondiendo principalmente a las tres especies conocidas de neutrinos: el neutrino electrónico, el muónico y el tauónico. Los neutrinos son las únicas partículas relativistas a las temperaturas cosmológicas actuales. Sin embargo, este número puede variar ligeramente dependiendo del modelo y de la temperatura que se esté examinando. Por ejemplo, si se consideran partículas adicionales, el número efectivo de especies relativistas podría ajustarse para reflejar esas condiciones.

REFERENCIAS

- [1] Abazajian K. y García Escudero H. (2023). Visible in the laboratory and invisible in cosmology: Decaying sterile neutrinos. *Phys. Rev. D* 108 September 20, 2023. e-Print: 2309.11492 [hep-ph] <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.108.123036>
- [2] García Escudero H., Kuo, J., Keeley, R. y Abazajian K. (2022) Early or phantom dark energy, self-interacting, extra, or massive neutrinos, primordial magnetic fields, or a curved universe: An exploration of possible solutions to the H_0 and Ω_8 problems. *Phys. Rev. D* 108 August 30, 2022. e-Print: 2208.14435 <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.103517>
- [3] Naredo-Turedo, D., Escudero, M., Fernández-Martínez E., et al. (2024). Living at the Edge: A Critical Look at the Cosmological Neutrino Mass Bound. (July 30th, 2024), e-Print: 2208.14435
- [4] Planck Collaboration. (2018). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astron.Astrophys.* 641 (2020) A6 Jul 17, 2018. DOI = [10.1051/0004-6361/201833910](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910)
- [5] G. Adame et al. DESI 2024 VI: Cosmological Constraints from the Measurements of Baryon Acoustic Oscillations. (April 3rd 2024). e-Print: 2404.03002
- [6] Craig N., Green D., Meyers J., y Rajendran S. No Ω_8 is Good News. (May 1st, 2024) *JHEP*, 09:097, 2024. DOI = [10.1007/JHEP09\(2024\)097](https://doi.org/10.1007/JHEP09(2024)097)
- [7] Hu J. y Wang F. Hubble Tension: The Evidence of New Physics. *Universe* 9 (February 2023) DOI = [10.48550/arXiv.2302.05709](https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.05709)
- [8] Allali J., y Notari A. Neutrino mass bounds from DESI 2024 are relaxed by Planck PR4 and cosmological supernovae. (Jun 20, 2024) e-Print: 2406.14554
- [9] Euclid Collaboration. I. Overview of the Euclid mission. (May 22, 2024). e-Print: 2405.13491

ESPACIO_3: LA CIENCIA ES ARTE,

En física, geometría y matemáticas “un objeto es tridimensional si cada uno de sus puntos puede ser localizado especificando tres números dentro de un cierto rango”. Espacio_3: laboratorio de Ciencia y artes escénicas, es un espacio tridimensional: nuestro “objeto” es el mensaje científico, y los ejes son la divulgación, el teatro y la impro; el rango es la ciencia y tecnología. Dicho de otra forma, tres enfoques, tres salas y un único tema...o diez: búsqueda, inteligencia, límites, imagen, mujeres, libertad, movimiento, origen, estrellas y caos. Una serie de diez eventos con un total de 30 producciones individuales, de octubre de 2023 a julio 2024. También Espacio_3 ha llevado el centro de nuestra galaxia al Palacio de Carlos V del conjunto histórico de la Alhambra de Granada. Allí, cinco máscaras para cinco estrellas contaron la historia del descubrimiento del agujero negro supermasivo SgrA*. Hemos usado el cuerpo, el teatro y la danza para crear una infografía humana sobre uno de los descubrimientos más importantes de la astronomía moderna.



Sara Cazzoli

Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC)
sara@iaa.es
@saracazzoli

LA IDEA

¿En qué conectan el mundo de la ciencia y el del arte?

Tanto el arte como la ciencia parten de un mismo estímulo: la curiosidad y el asombro. Desde esta base inicial compartida, las diferencias son menos rígidas de lo que pareciera a primera vista: por ejemplo, ambas materias comparten la interrogación, la voluntad de conocer y la creatividad.

Tanto científicos como artistas cuando miran “extrañados” la naturaleza (humana y no), imaginan problemas, posibles respuestas, inventan métodos y caminos para resolverlos.

La idea de crear “Espacio_3: laboratorio de ciencia y artes escénicas” surge de la necesidad de nuevos espacios de interacción, creación y experimentación entre la divulgación científica y el arte.

La filosofía de este espacio se basa en la convergencia y sinergia de tres técnicas diferentes de comunicación y expresión: el teatro, la improvisación y el discurso. Áreas tan diversas cuya amalgama permite establecer conexiones nuevas, buscar respuestas y plantear nuevas preguntas.

La CIENCIA sirve de inspiración a muchos artistas tanto como metáforas, como historias humanas. El TEATRO es el arte de representar historias y temas universales y ¿por qué no? De ciencia y tecnológica. La IMPRO: una experiencia teatral colaborativa entre actores y público es un diálogo en el que el público es uno de los protagonistas.

Espacio_3 ha sido un espacio de intercambio que ha dotado al investigador/divulgador de nuevas habilidades comunicativas propias del teatro y de las técnicas de improvisación, como el desarrollo de un talento escénico; la cooperación y la escucha, la predisposición a lo inesperado o la pérdida del miedo a equivocarse. Un proyecto donde, a su vez, los creadores artísticos rompan el ancestral miedo a lo científico y tecnológico, y descubran en estos conceptos una inagotable fuente de creatividad artística. Hemos propuesto una experiencia donde en el mismo evento, una vez al mes, la audiencia pueda disfrutar de estos tres diferentes formatos para contar historias universales y personales, con la ciencia como denominador común.

*“Granada. Albaicín. Un palacio del siglo XVI.
Un patio, tres salas y tres formatos: teatro, improvisación y divulgación.
Una compañía de más de cincuenta profesionales.
Una cita fija con la ciencia y las artes escénicas, diferente cada mes.
Una serie de diez eventos que han entrado con gran éxito
en la programación cultural granadina.
Un laboratorio. Una idea.
Esto ha sido Espacio_3: Laboratorio de Ciencia y Artes Escénicas.”*



LA EXPERIENCIA

En Espacio_3 hemos creado una “experiencia inmersiva y participativa” de casi 100 minutos de duración. Con una mirada poliédrica hacia un tema, explotamos tres formatos, y tres técnicas: Ciencia, Teatro, Impro.

La divulgación científica se ha subido por primera vez a las tablas del Palacio del Almirante, en el Albaicín, perteneciente al centro cultural universitario de la Universidad de Granada. En este imponente palacio del siglo XVI en tres salas se ofrecen sendas

historias creadas, escritas y producidas desde cero cada mes. Con su propio formato, lenguaje, técnica y protagonistas, pero todas ellas engarzadas sobre un mismo concepto común que actúa como hilo conductor y que varía de mes en mes.

Durante el evento, el lugar de bienvenida y recepción, es el patio del Palacio. Allí se contextualiza el concepto protagonista, se organizan los grupos, se baila y se juega. Pero sobre todo es entre esas columnas que comienza el espectáculo.





Posteriormente el público se mueve secuencialmente entre las tres salas, con pases simultáneos de 20 minutos cada uno. Este formato flexible y dinámico, inspirado en el [Microteatro por Dinero](#) (Madrid), permite descubrir la potencia y los matices de cada formato a la hora de transmitir un concepto.

Con la Alhambra como paisaje, la “Sala Mirador” ofrece la divulgación más directa: charlas de ciencia contadas de tú a tú por sus protagonistas, un formato “tradicional” con toques teatrales.

La “Sala roja” tiene un techo de madera antiguo y un escenario de tela roja creando un entorno íntimo para el teatro, el arte de representar historias. En Espacio_3, se escriben y producen obras originales que usan la ciencia y la tecnología como motor o trasfondo.

Las ventanas de la “Sala negra”, por su suelo de cerámicas oscuras, dan sobre la Catedral de Granada. Este paisaje envuelve al público, sin distraer: participa en la propuesta de Improvisación creando una experiencia teatral colaborativa





entre actores y público y la historia se construye a medida que avanza.

No hay experimento sin un observador y no hay espectáculo sin un público. El público de Espacio_3 no es pasivo: no se limita a mirar. Desde la bienvenida hasta el final, la participación ciudadana en Espacio_3 es constante: preguntas en la sala de Ciencia, votaciones en un desfile de modelos en la sala de Teatro, o papeletas en la sala de Impro.

En resumen: tres enfoques, tres salas y un único tema...o diez: búsqueda, inteligencia, límites, imagen, mujeres, libertad, movimiento, origen, estrellas y caos.

Conceptos cercanos al público pero no por eso menos potentes: ¿es posible hacer paralelismos entre las técnicas de maquillaje y las del tratamiento de imágenes astronómicas? ¿O que Marie Curie adquiere poderes radiactivos?

En Espacio_3 ha sido posible. Esto y mucho más.

DIEZ ESPECTÁCULOS, UNA EXPLOSION ARTISTICA... ¡ Y CIENTIFICA!

BÚSQUEDA. Hablamos de exoplanetas, de la **búsqueda** de vida fuera de nuestra galaxia y de lo que se encuentra en el camino.

INTELIGENCIA. Nos desplazamos a Oz, donde un espantapájaros buscaba un cerebro y un hombre de lata encontraba su **inteligencia** emocional.

LÍMITES. ¿Es el universo infinito? ¿Se acaba la energía? ¿Cuándo parar de comer pipas? Una sinfonía sobre el **límite** y sus muchos significados.

IMAGEN. Jugamos con las **imágenes**, desde las del espejo de maquillaje de casa hasta las captadas por un gran telescopio.

MUJERES #11F. Espacio_3 se convirtió en un laboratorio, un velatorio y un cine para promover la igualdad y la inclusión. Sesiones violetas dedicadas a las **mujeres**.

MOVIMIENTO. Desde las partículas hasta las estrellas, nada en el universo está quieto. Espacio_3 también se **mueve**: de la astrofísica a la danza, teatro y humor.

ORIGEN. ¿Se puede contar el **origen** del Universo con música tecno? ¿Se puede hacer comedia del arte sobre la ciencia y además improvisada?

ESTRELLAS. Somos polvo de **estrellas**. En estas majestuosas, brillantes esferas de materia ardiente encontramos algunas claves de nuestro origen, futuro y... ¡alegría!

CAOS. Damos entrada al caos, a la entropía, al desorden... ¿Seremos capaces de lograr una estructura? Que sea de un matrimonio o del Universo.

LIBERTAD. ¡**Libertad** de creatividad creciente! Dos nuevas ideas: open mic y escape room, y una charla sobre los puentes entre la ciencia abierta y la política.





ESCAPE ROOM: la libertad tiene su precio

El público asistente se unía a un grupo de investigación internacional distribuido entre tres salas con el fin de superar un reto astronómico a diferentes frecuencias, guiados por un investigador ciego, una estudiante extranjera y un científico transexual. La libertad también es diversidad.

OPEN MIC DE CIENCIA: El público sale al escenario

Tomamos prestado este formato a los cómicos que suelen emplearlo para probar monólogos nuevos, ofreciendo al público de Espacio_3 la posibilidad de compartir sus inquietudes científicas en un escenario muy céntrico e icónico para la ciudad de Granada: la Sala Aliatar.

Hubo ciencia de todo tipo en 16 actuaciones de seis minutos cada una, cubriendo diferentes formatos, desde monólogos hasta música o poesía. De los 21 participantes, hubo quienes se estrenaron y quienes no perdieron la oportunidad de volver a subirse a las tablas. Estudiantes, profesionales de la ciencia y público en general respondieron al reto. ¡Y todo esto al grito de “1, 2, 3: Espacio 3”!

¡MOVIMIENTO, TEATRO, SgrA* ... Y TELÓN!

Gracias al apoyo de la Sociedad Española de Astronomía, el conjunto histórico de la Alhambra no sólo fue telón de fondo, sino también escenario para realizar el vídeo de divulgación: “Movimiento, teatro, SgrA* ... y telón” estrenado en la *Feria del libro de Granada* (Abril 2024).

Hemos conseguido llevar el centro de nuestra galaxia a Granada, al Palacio de Carlos V. Allí hemos utilizado el cuerpo, el teatro y la danza para crear una auténtica infografía humana sobre uno de los descubrimientos más importantes de la astronomía moderna.

El estudio del movimiento de las estrellas alrededor del centro de nuestra galaxia fue una de las pruebas más importantes de la existencia de un agujero negro supermasivo, SgrA*. Existen numerosas infografías que recrean las órbitas de estas estrellas, reflejo del trabajo de los grupos galardonados con el Premio Nobel de Física de 2022.

Dimos forma humana a un conjunto de cinco estrellas que orbitan alrededor de SgrA* y recreamos su danza orbital a su alrededor, a escala humana, con

rigor científico. Hemos utilizado la máscara teatral como instrumento de precisión y su uso no fue arbitrario. Su diseño responde a una representación plástica y artística de las diferentes propiedades de las estrellas protagonistas: edad, color y movimiento.

Para ejemplo, un botón. Os presentamos a tres estrellas:



S2. Ha nacido para el escenario. Es la más estudiada, la más rápida, la más brillante. Presume mucho, con razón, al fin y al cabo es la "reina" de las estrellas del centro galáctico.



S14. Entre las cuatro estrellas jóvenes, la que brilla menos. Quizás por eso es gruñona. O es que ¿tiene envidia de S2?



S17: De nuestras protagonistas es la más mayor. Sin embargo mantiene un espíritu joven...Es capaz de moverse a la misma velocidad con tal de darles la chapa con sus aventuras de joven pizpireta.

Cinco máscaras para cinco estrellas contaron la historia del descubrimiento del agujero negro supermasivo de la Vía Láctea. Bajo el lema: El movimiento pone en evidencia el punto fijo. Esta es la séptima ley del teatro, propuesta por Jacques Lecoq y una metáfora de la ciencia.

En 1956, cuando Lecoq fundó su escuela, no había pruebas firmes de la existencia de un agujero negro supermasivo en el centro de nuestra galaxia, SgrA*. Ahora no sólo conocemos el movimiento de las estrellas a su alrededor, sino que también tenemos su imagen.

Y podemos decir alto y claro que el movimiento pone en evidencia el punto fijo: tanto en el centro de las galaxias como en un escenario.

Es una pequeña pero gran historia que merece ser contada a través de la fusión de la astronomía y las artes escénicas.

UN GRUPO QUE TRABAJA EN EQUIPO

Pocas cosas surgen porque sí. Todo suele preceder de un camino previo que un grupo de personas ha recorrido casi sin pretenderlo, de una manera natural, llevados por sus inquietudes y curiosidad.

Espacio_3 ha sido el puerto natural en el que desemboca la trayectoria de un grupo de personas convencidas de que las artes escénicas son la herramienta perfecta para emocionarse con la ciencia y la tecnología; y que la ciencia y la tecnología son el contenido perfecto para hilvanar historias humanas sobre el escenario o la pantalla.

Al inicio del proyecto se dedicaron dos días al fomento del talento interdisciplinario, con jornadas de juegos para descubrir conexiones entre la ciencia y las artes escénicas, así como entre las personas. Estas jornadas incluyeron cuatro *masterclass*, cubriendo áreas como divulgación, teatro, improvisación y dramaturgia, con casi 30 horas de formación para todos los componentes del equipo.

Entre bastidores de Espacio_3, hay un equipo grande de más de 55 personas: científicos/as, divulgadores, intérpretes y técnicos de iluminación y escenografía; un ecosistema de trabajo paritario e internacional.

Un grupo increíble que ha logrado hacer realidad el desafío de crear una producción nueva desde cero cada mes, además creando las condiciones para que ocurra “algo auténtico”: la experiencia de Espacio_3.

Espacio_3: laboratorio de Ciencia y Artes Escénicas, es un proyecto liderado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía en colaboración con la Fundación Española de Ciencia y Tecnología, la Universidad de Granada, la Madraza: centro de cultura contemporánea y dos compañías teatrales de Granada: La Carpintería y El Apeadero.

Este artículo ha sido escrito por Sara Cazzoli, directora del proyecto a nombre de todo el equipo de Espacio_3; agradece a su equipo, los colaboradores y a quién ha creído en la idea ... y en ella.



EL SILENCIO DE LA LUNA:

La historia de la ciencia en culturas no occidentales, y la de China en particular, sigue siendo relativamente poco conocida en Europa, debido en parte a la barrera idiomática que suponen las fuentes en chino y a la persistencia de narrativas eurocéntricas. Aunque existen importantes obras de divulgación sobre los avances científicos chinos, este vasto legado intelectual sigue infrarrepresentado. La expresión artística, y en particular la música, ofrece una vía única para acercar al público a este patrimonio, rompiendo estereotipos y generando una comprensión más profunda y emocional. Iniciativas como las del grupo de música antigua *Todos los Tonos y Ayres* exploran, a través de producciones multidisciplinares, las conexiones en el tiempo entre Asia y Europa, presentando una visión matizada y enriquecedora de la historia del pensamiento sobre el cosmos.



Rubén García Benito

Ensemble *Todos los Tonos y Ayres*
Instituto de Astrofísica de Andalucía
ruben@tonosyayres.com

Abigail R. Horro

Ensemble *Todos los Tonos y Ayres*
Ensemble *Vermell*
abigail@abigailhorro.com

x.com/tonosyayres

INTRODUCCIÓN

En Europa, la historia de la ciencia en culturas no occidentales, y la de China en particular, sigue siendo relativamente desconocida tanto para el público general como para muchos campos académicos ajenos a la sinología. Esta brecha se debe en parte a la abundancia de fuentes primarias disponibles principalmente en chino y otros idiomas no occidentales, lo que limita su accesibilidad. A pesar del creciente número de recursos en lenguas europeas, los logros de la ciencia y la filosofía china antigua son con frecuencia pasados por alto, manteniéndose el énfasis en narrativas occidentales. Incluso obras accesibles en lenguas europeas, como el trabajo enciclopédico de Joseph Needham [1], que destaca los avances chinos en ciencia y tecnología, no han logrado permear por completo el ámbito académico o el conocimiento público en general, dejando este vasto patrimonio intelectual subestimado fuera de los círculos especializados.

Esta falta de conocimiento va más allá de la mera omisión académica; también intervienen percepciones culturales. Las visiones modernas sobre las comunidades migrantes —y sobre China en particular, en el contexto de este estudio— suelen estar moldeadas por factores geopolíticos y socioeconómicos contemporáneos, que derivan en estereotipos y representaciones erróneas que impiden una comprensión más profunda de sus contribuciones históricas e intelectuales. Para abordar estos prejuicios, las artes —especialmente la música, las artes escénicas y otras formas de expresión creativa— ofrecen un medio único y poderoso para involucrar al público a un nivel más profundo y empático. A diferencia de las conferencias tradicionales, las representaciones artísticas pueden salvar divisiones culturales, atrayendo al público hacia una narrativa que fomenta conexiones emocionales y un sentido de experiencia humana compartida.

Las representaciones artísticas, en particular la música, pueden desempeñar un papel vital en el desmantelamiento de estereotipos y en la transformación de la percepción pública sobre otras culturas, promoviendo una comprensión más matizada de identidades culturales diversas [2]. La capacidad transformadora de las artes ha demostrado ser esencial para promover la inclusión social, cultivar la empatía y tender puentes entre las comunidades migrantes y nativas, cambiando en última instancia las actitudes sociales hacia una perspectiva multicultural más cohesiva y respetuosa [3, 4].

MÚSICA Y PALABRA BAJO EL CIELO CHINO

La música tradicional desempeña un papel significativo en la ruptura de estereotipos y en la remodelación de percepciones sobre culturas diversas cuando se integra en representaciones culturales. Las actividades musicales pueden contribuir a transformar las fronteras culturales y a desafiar divisiones sociales arraigadas. La música lleva inherentemente el patrimonio y la identidad de diversas comunidades culturales, fomentando una mayor comprensión y apreciación en las sociedades de acogida [5].

En particular, la apreciación de la música antigua del pasado remoto evoca un sentido de continuidad histórica, que refuerza el patrimonio cultural de una comunidad específica. Esta conexión histórica no solo profundiza el compromiso del público, sino que también subraya la importancia de preservar las tradiciones culturales en un mundo que cambia rápidamente. En este contexto, la música sirve no solo como un medio de reconocimiento cultural, sino también como una herramienta de integración social, fusionando identidades de "nosotros" y "ellos" mientras se atenúan las distinciones culturales en favor de experiencias compartidas, mayor empatía y una comprensión más matizada de las identidades culturales y del aprecio mutuo [6, 7]. Estos hallazgos indican que la música multicultural es un medio poderoso para transformar las percepciones de la población de acogida sobre culturas extranjeras, usando la apreciación cultural para desafiar estereotipos y fortalecer el entendimiento social.

A través de una producción cuidadosamente concebida, que fusiona música, poesía y textos históricos, es posible sumergir al público en las ricas tradiciones científicas y filosóficas de diversas culturas, con especial atención a la de China. Este tipo de espectáculo no solo estimula los sentidos, sino que también desafía preconceptos, ofreciendo una visión matizada de China que abarca milenios. Al integrar las voces de los primeros filósofos naturales junto a escritores chinos contemporáneos de ciencia ficción —cuyas obras han obtenido reconocimiento internacional—, estas producciones fomentan un diálogo entre pasado y presente, entre Oriente y Occidente. Este enfoque artístico tiene, por tanto, el potencial de enriquecer la comprensión pública, ofreciendo una perspectiva más equilibrada e informada de otras culturas que trasciende los estereotipos contemporáneos y las tensiones políticas.

TODOS LOS TONOS Y AYRES

Todos los Tonos y Ayres es un conjunto de música antigua pionero en España, dedicado a explorar y recrear las conexiones históricas y musicales entre Europa y Asia. Fundado con la misión de tender puentes culturales a través de la música y la investigación musicológica, el conjunto se especializa en interpretar con rigor histórico repertorios inexplorados o poco conocidos, a menudo redescubriendo obras olvidadas que iluminan siglos de intercambio intercultural. Con un enfoque en las tradiciones musicales tempranas, el grupo fusiona investigación académica con creatividad artística, permitiendo al público experimentar la música en su contexto histórico y cultural. Cada programa revela conexiones históricas frecuentemente pasadas por alto, respaldadas por una investigación exhaustiva tanto de fuentes documentales como de la cultura material. Esta integración de investigación académica [8], interpretación histórica [9] y creación artística es el pilar fundamental de su trabajo.

A lo largo de los años, *Todos los Tonos y Ayres* ha establecido colaboraciones significativas con instituciones culturales y académicas de prestigio, tanto en España como en el extranjero. Una de sus colaboraciones más destacadas tuvo lugar durante [una gira en China en 2018](#), organizada por el Instituto Cervantes y la Embajada de España. Esta gira incluyó un programa dedicado a la figura olvidada del jesuita español Diego de Pantoja (1571–1618), ejemplificando el compromiso del conjunto con el diálogo intercultural. En 2024, el conjunto regresó a China para actuar de nuevo en el [Instituto Cervantes de Pekín](#), donde ofreció su programa más reciente, centrado en una mujer europea del siglo XIV que vivió y murió en la China Imperial. Este programa resaltó una figura histórica olvidada, subrayando su papel en la conexión entre Oriente y Occidente. A través de estos programas, el conjunto trata de demostrar cómo la música puede trascender fronteras geográficas y temporales, fomentando conexiones entre culturas aparentemente distantes.

El compromiso de *Todos los Tonos y Ayres* con la exploración multidisciplinar los ha llevado también a incursionar en la escena musical contemporánea, participando en festivales de vanguardia de gran transversalidad, como el Festival Internacional de Arte Sonoro y Música Electroacústica, entre otros.

En estos entornos, el conjunto ha [estrenado obras de compositores contemporáneos](#), promoviendo un intercambio dinámico entre las formas tradicionales y los paisajes sonoros experimentales.

En esta misma línea, a través de proyectos innovadores como [El silencio de la luna: música y palabra bajo el cielo chino](#), el conjunto continúa expandiendo los límites de la interpretación tradicional, integrando la música con otras formas artísticas, como la poesía, la ciencia, la propuesta performática y el arte visual. Este programa crea un espacio único donde la cosmología china y europea junto con las tradiciones musicales de ambas culturas convergen armoniosamente, ofreciendo al público una experiencia inmersiva y reflexiva que destaca la búsqueda humana compartida por comprender el universo.

MÚSICA Y PALABRA BAJO EL CIELO CHINO

Los orígenes del proyecto se remontan a 2016, cuando la Ciudad de las Artes y las Ciencias propuso una [conferencia](#) sobre la astronomía antigua china, enriquecida con acompañamiento musical. Esta presentación exploró las intersecciones entre ambos campos en la cultura china antigua, con piezas selectas interpretadas en el *guzheng*, una cítara tradicional china. Aunque la conferencia constituía el núcleo principal, esta fusión inicial de ciencia y música sembró las primeras semillas de lo que sería una visión mucho más amplia.

En 2017, durante el primer Festival de Música y Ciencia organizado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), el conjunto fue invitado a desarrollar esta fusión, creando un breve espectáculo de 20 minutos que buscaba una integración más equilibrada de música y ciencia. Este concepto se amplió en 2019 en el II Festival de Música y Ciencia en la Estación Experimental del Zaidín, donde presentamos una versión refinada de 25 minutos. Estas primeras versiones sirvieron de inspiración para [El silencio de la luna](#).

A partir de estas presentaciones iniciales, decidimos desarrollar la idea en una producción completa y vanguardista de 60 minutos. Este espectáculo de larga duración se estrenó el 7 de junio de 2023 en el Teatro Juan del Enzina de Salamanca, como parte de las actividades académicas abiertas al público organizadas por el III Congreso de la

Asociación Española de Estudios de Asia Oriental celebrado en la Universidad de Salamanca.

[El silencio de la luna: música y palabra bajo el cielo chino](#) presenta una exploración innovadora del patrimonio poético, musical y científico de China. Esta actuación abarca 2500 años de historia intelectual y artística, entrelazando melodías europeas con los sonidos de China, poemas celestiales antiguos, el Tao de la cítara, y culminando con obras del siglo XX. Teje un tapiz cronológico de ciencia, literatura, filosofía y música.

La actuación se centra en una cuidada selección de textos científicos, que abarcan desde los primeros filósofos de la naturaleza hasta la ciencia ficción contemporánea, destacando tanto perspectivas masculinas como femeninas. A lo largo de la obra, se entrelazan también voces de astrónomas, poetas y pintoras chinas, cuyas reflexiones sobre género, arte y ciencia revelan las complejas funciones sociales de las mujeres en sus contextos culturales e históricos. Los textos científicos europeos aparecen a lo largo de la obra para crear un diálogo imaginado entre Oriente y Occidente, donde conceptos articulados en China siglos antes de su reconocimiento en Occidente emergen, resaltando un intercambio intercultural que trasciende tiempo y espacio.

Estas voces se armonizan con selecciones musicales chinas que abarcan desde obras antiguas hasta contemporáneas, estableciendo paralelismos entre los periodos medieval, renacentista y barroco en instrumentos chinos. Piezas musicales occidentales, incluyendo obras de compositoras, enriquecen la actuación y crean una dinámica interacción entre las tradiciones chinas y europeas.

Como hilo conductor de la parte sonora, el espectáculo se acompaña de una selección cuidadosamente elegida de proyecciones visuales que enriquecen y dialogan con la música y la palabra, proporcionando el contexto adecuado para profundizar la experiencia. Estas imágenes y vídeos incluyen pinturas, caligrafías y manuscritos científicos chinos, entre ellos el mapa estelar más antiguo que se conserva, situando la actuación en un marco visual evocador que no solo complementa, sino que también amplifica el viaje intercultural, otorgándole mayor profundidad y significado.



Izquierda: Momento de la interpretación del programa *El silencio de la luna*: música y palabra bajo el cielo chino por el conjunto *Todos los Tonos y Ayres* en el Teatro Juan del Enzina, Salamanca, junio de 2023. Abajo, foto de los autores.



El silencio de la luna da voz a autores y autoras a través de una combinación de sonido e imagen, entrelazando la resonancia de la palabra hablada con elementos musicales y visuales. Este intercambio artístico presenta obras de una diversidad de voces, incluyendo figuras notables como Qu Yuan 屈原 (siglo IV a.C.), Wang Bi 王弼 (siglo III), Zhang Zai 张载 (siglo XI), Hildegarda von Bingen (siglo XII), Galileo Galilei (siglo XVII) y Wang Zhenyi 王贞仪 (siglo XVIII), entre otras, además de un rico mosaico de textos anónimos antiguos y escritores chinos de ciencia ficción contemporánea, abarcando más de 2000 años. En relación a la respuesta del público, destaca el testimonio de un espectador que, al concluir la actuación, expresó: "Nunca imaginé que un espectáculo abordando temas como la astronomía o la física pudiera conmoverme de esta manera". Esta reflexión subraya el éxito del programa en superar expectativas y generar respuestas emocionales a través de su enfoque innovador en temas culturales y científicos.

A través de una narrativa triple de música, poesía y arte visual, esta actuación busca abrir nuevas vías de comprensión en el estudio de la naturaleza, presentando una historia de la ciencia independiente de las tradiciones occidentales. Al hacerlo, amplía nuestra perspectiva sobre las formas y métodos de la exploración humana de los fenómenos naturales del mundo.

REFERENCIAS

- [1] Needham, J., Wang L., Meétailie, G., Huang, H. T. 1954, *Science and Civilisation in China*, University Press
- [2] Meerzon, Y., Dean, D., McNeil, D. (Eds.). *Migration and Stereotypes in Performance and Culture*. Springer International Publishing, 2020
- [3] Sievers, W. 2021, *Comparative Migration Studies*, 9, 33
- [4] Crooke, A. H. D., Thompson, W. F., Fraser, T., Davidson, J. 2024, *Musicae Scientiae*, 28(1), 18-38
- [5] Vuoskoski, J. K., Clarke, E. F., DeNora, T. 2017, *Psychology of Music*, 45(4), 584-599
- [6] Parzer, M., Mijić, A., 2024. Continuity or Change? How Migrants' Musical Activities (Do not) Affect Ethnic Boundaries, in: Sievers, W. (Ed.), *Cultural Change in Post-Migrant Societies: Re-Imagining Communities Through Arts and Cultural Activities*. Springer International Publishing, pp. 39–58
- [7] Gustafson, R.I., 2020. Fictions of Origin: Music Appreciation, Multiculturalism, and World Music, in: Gustafson, R.I. (Ed.), *Exploring Diasporic Perspectives in Music Education*. Springer International Publishing, pp. 59–88
- [8] Ramos, I., García Benito, R. 2024, *Araucaria*, 26, 56
- [9] *El clave del Emperador: Diego de Pantoja and his legacy*. Todos los Tonos y Ayres & Íliber Ensemble. Notas al CD por Rubén García-Benito. IBS Classical (IBS142021), 2021

CURSO SOBRE GÉNERO Y CIENCIA.

A lo largo del pasado año 2023 organizamos desde la Comisión Mujeres y Astronomía (CMyA) de la SEA un curso online de formación sobre igualdad de género en ciencia (<https://www.sea-astronomia.es/noticias/curso-online-de-formacion-en-igualdad-de-genero-en-ciencia-2023>). El objetivo era pasar de un análisis general, que habíamos tratado en actividades anteriores, a un abordaje específico de aspectos concretos de la situación de desigualdad de género en ciencia, como los estereotipos en la educación, los sesgos subliminales o el acoso. De esta forma podíamos dar una información más detallada sobre estas temáticas específicas, y proporcionar recursos más amplios con los que tratar sus causas y consecuencias. El curso contó con once sesiones temáticas, dirigidas por personas expertas en los ámbitos correspondientes.



Comisión Mujer y Astronomía
Sociedad Española de Astronomía

El curso estaba diseñado para tener una amplia aplicabilidad, no solo en astrofísica e investigación sino también en otras áreas científicas y en otros perfiles laborales relacionados con la ciencia. Por ello decidimos abrir la inscripción más allá de los miembros de la SEA o de la comunidad astronómica española, y amplificar así su utilidad. La inscripción fue un éxito: contamos con más de 420 personas inscritas. De ellas, 137 obtuvieron el certificado final de asistencia, proporcionado a quienes asistían a un mínimo del 72% de las charlas. Para la organización del curso fue fundamental contar con la financiación de la propia SEA, así como del Donostia International Physics Center (DIPC), del Observatorio Astronómico de la Universitat de València (OAUV), del Instituto de Física de Cantabria (IFCA) y del Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA).

Las sesiones se impartieron de forma mensual a lo largo de todo 2023, exceptuando únicamente el mes de agosto. Los vídeos de todas las sesiones son públicos y están disponibles en la web del curso (<https://www.sea-astronomia.es/noticias/curso-online-de-formacion-en-igualdad-de-genero-en-ciencia-2023>). Son conferencias muy útiles, que aportan un análisis riguroso y revelador sobre los temas tratados y su influencia en nuestro entorno laboral y personal, y que también proporcionan herramientas para abordar situaciones que nos pueden surgir a cualquiera en nuestro trabajo cotidiano. Desde la CMyA os animamos encarecidamente a tenerlas en cuenta como referencia y recurso. Para facilitaros su consulta os hacemos aquí un resumen de lo que allí se recoge:

SESIÓN 1. INTRODUCCIÓN: AVANCES Y DESAFÍOS PARA UNA IGUALDAD EN CIENCIA.

ZULEMA ALTAMIRANO (UMYC, MCINN)

La ponente, Zulema Altamirano, en ese momento Directora de la Unidad Mujeres y Ciencia del Ministerio de Ciencia e Innovación, introduce el curso hablando sobre cómo avanzar en igualdad, enfatizando la importancia de visibilizar, legislar y educar. Describe los principales retos de la igualdad en ciencia en España: atraer talento femenino en áreas STEM, retener y desarrollar dicho talento, abordar los sesgos de género y el acoso sexual en el ámbito laboral, e incluir la dimensión de género en la I+D+i. La charla nos proporciona información específica sobre estudios estadísticos europeos y españoles que publican regularmente datos actualizados sobre este



The image shows a video conference slide. At the top left, there are logos for the Spanish Government (GOBIERNO DE ESPAÑA), the Ministry of Science and Innovation (MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN), and the Unit for Women and Science (umvc UNIDAD DE MUJERES Y CIENCIA). In the top right corner, there is a small video feed of a woman, Zulema Altamirano. The main text on the slide reads: "Introducción: Avances y desafíos para una igualdad en ciencia". Below this, it says "23 de Enero de 2023" and identifies the speaker as "Dra. Zulema Altamirano Argudo, Directora Unidad Mujeres y Ciencia, Ministerio de Ciencia e Innovación".

tema. También nos informa sobre los avances más recientes en el marco legislativo europeo y español, así como acerca de las iniciativas institucionales que se están desarrollando actualmente sobre este tema.

SESIÓN 2. EDUCACIÓN UNIVERSITARIA CON PERSPECTIVA DE GÉNERO.

ENCINA CALVO (USC) E IRENE EPIFANIO (UJI)

Encina Calvo, doctora en Ciencias Físicas, e Irene Epifanio, catedrática de Estadística e investigación operativa, han elaborado la "Guía para una docencia Universitaria con perspectiva de género" enfocada en matemáticas. En esta sesión sobre educación con perspectiva de género, las ponentes abordan la baja representación de mujeres en física y la necesidad de transformar la imagen masculina del campo, enfatizando la importancia de contar con aliados masculinos en este proceso. Proponen estrategias para incorporar la perspectiva de género en el aula, como promover la participación equitativa y crear un ambiente que fomente la autoestima de las alumnas. Sugieren resaltar la contribución de mujeres en la ciencia, así como utilizar recursos inclusivos y metodologías que favorezcan

la colaboración. También abogan por una evaluación variada y anónima. Enfatizan la necesidad de fomentar relaciones interpersonales basadas en la empatía y el respeto, con un enfoque en la corresponsabilidad y la inclusión. A pesar de la existencia de leyes que apoyan la igualdad de género, enfatizan que su implementación es deficiente, lo que resalta la necesidad de un cambio cultural y educativo más profundo.

SESIÓN 3. SESGOS SUBLIMINALES EN CIENCIA.

LIDIA PUIGVERT (UB, CREA)

Lidia Puigvert es profesora de sociología en la Universidad de Barcelona e investigadora del Centro de Investigación Social y Educativa (CREA). Es experta en causas y prevención de la violencia entre los jóvenes, especialmente en el campo de la investigación. En esta ponencia habla de cómo diferenciar lo que son los bulos de las evidencias científicas en género, ya que de ello depende el poder identificar correctamente sesgos subliminales, superar la desigualdad y la violencia de género y, en consonancia, mejorar la excelencia científica. Recalca que en el entorno académico no se puede dar por hecho que toda la

información sobre género está basada en evidencias científicas, ya que esta información no siempre surge de investigaciones previas y artículos científicos. La ponente plantea ejemplos habituales de sesgos subliminales que muchas veces no detectamos, pero cuya identificación mejora las relaciones igualitarias en cualquier entorno, incluido el ámbito científico. Apoyando las relaciones igualitarias y rechazando las relaciones violentas, sumisas, jerárquicas y feudales (que es donde encontramos los sesgos subliminales) nos llevará a entender que creando entornos libres de violencia, donde el diálogo y el acuerdo sean la base de las decisiones que tomamos, podremos transformar y generar entornos libres de violencia de género.

SESIÓN 4. RIQUEZA DE GÉNERO E IDENTIDAD. EVA LUNA DÍAZ (PRISMA)

Eva Luna Díaz es socióloga y antropóloga médica, especialista en estudios sociales de la ciencia en torno a las dimensiones de género, parentesco y bioética. También es colaboradora de la asociación PRISMA (Asociación para la diversidad afectivo sexual y de género en ciencia, tecnología e innovación), acti-

vista feminista y LGTBIQA+. Durante la sesión, Eva introdujo estudios sociológicos que demuestran que las personas pertenecientes al colectivo LGTBIQA+ sufren más experiencias de acoso, exclusión o intimidación en la sociedad en general y en la ciencia en particular. Este acoso se acentúa en las personas trans y no binarias, y el entorno austero hace que abandonen la carrera científica o se invisibilicen en el sector. A su vez, esto genera que no se incluya la perspectiva de las diversidades de identidad de género y de orientación afectivo sexual en las investigaciones científicas, y a que no destaquen las evidencias científicas que pueden ayudar a evitar la lgtbfobia y educar en igualdad. Para entender mejor esas diversidades, la ponente explicó cuatro conceptos básicos: sexo biológico, identidad de género, orientación afectivo sexual y expresión del género. Evidencias históricas y científicas muestran que abrazar la diversidad evita convertir estereotipos en prejuicios que llevan a LGTbfobias (delitos de odio). Para ayudar a alcanzar este objetivo Eva también introdujo las 10 medidas PRISMA para la igualdad LGTBIQA+ en centros de investigación.

Ciencia, lenguaje no sexista y lenguaje inclusivo

COMISIÓN MUJER Y ASTRONOMÍA SDAD. ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA
MARÍA MARTÍN
16 DE MAYO DE 2023

Ilustradora: Ellogio Mente

Wang Zhenyi (Astrónoma)

dipc Observatori Astronòmic Universitat de València
iFCA Institut de Física de Cantabria
CEFC

Maria Martín Barranc...

SESIÓN 5. LENGUAJE INCLUSIVO.

MARÍA MARTÍN BARRANCO (EVEFEM)

María Martín Barranco es licenciada en derecho, directora de la Escuela Virtual de Empoderamiento Feminista (EVEFem) y escritora. En esta sesión nos enseña que el lenguaje no sexista, el lenguaje inclusivo, y la comunicación no discriminatoria son las soluciones a tres problemáticas diferenciadas. Es necesario un lenguaje que incluya a las mujeres, que conscientemente visibilice otras realidades que interseccionan y cuyo acompañamiento audiovisual refleje dicha inclusividad. En ciencia, el lenguaje sexista invisibiliza a las científicas, con un problema doble: si están, no se las nombra ni se reconoce su labor, y si no están, no se puede reclamar su espacio, tradicionalmente minoritario en este entorno. Se proporcionan algunas recomendaciones para utilizar lenguaje no sexista como referirse a las científicas por su nombre, no por ser mujeres o por su nacionalidad; no usar el singular alegórico, que carga con el ideal de mujer de nuestra sociedad patriarcal; usar el femenino en primer lugar; o no usar el comodín de neutralizar, ya que cada quien lo interpreta dentro de su marco conceptual por lo que el uso del neutro invisibiliza otras realidades. "Tenemos derecho a nombrarnos, pero no a imponer como otras personas deben ser nombradas".

SESIÓN 6. ACOSO.

LIDIA PUIGVERT (UB, CREA)

Lidia Puigvert es profesora de sociología en la Universidad de Barcelona e investigadora del Centro de Investigación Social y Educativa (CREA). Es experta en causas y prevención de la violencia entre los jóvenes, especialmente en el campo de la investigación. En esta ponencia, Lidia se enfoca en tres temas relacionados con el acoso. Primero, presenta el acoso dentro del marco europeo, situándolo en el contexto del objetivo número 5 de igualdad de género. Explica cómo, antes de la estrategia europea de igualdad de género 2020-2025, el concepto de igualdad se desvinculaba del acoso; y destaca que a partir de dicha estrategia se incluyeron mecanismos para prevenir el acoso y la violencia de género, subrayando la importancia de legislar para proteger a las víctimas. Además, muestra la estrecha relación entre el acoso, la presencia de mujeres en carreras STEM y el problema del techo de cristal, ya que el acoso limita la promoción de las mujeres en la ciencia. Resalta

que el acoso implica cualquier conducta no deseada y, por lo tanto, no consentida, que impide la igualdad. Otro tema que aborda es el acoso en las instituciones y las medidas implementadas para prevenirlo. Específicamente, expone la normativa relativa a los planes de igualdad y protocolos anti-acoso en las universidades españolas, subrayando cómo un entorno seguro es fundamental para evitar la revictimización y eliminar un ambiente hostil en las instituciones. Finalmente, presenta cómo el entorno social, el papel de las interacciones desde la juventud y el poder del discurso coercitivo son algunas de las raíces del problema. Considera vital que las instituciones establezcan medidas para que las personas pierdan el miedo a denunciar, lo cual permitirá una ciencia no solo menos sexista, sino también más científica y humana.

SESIÓN 7. GENDER PERSPECTIVES

IN RESEARCH PROPOSALS.

JAKOB FELDTFOS (DIVERSIUNITY)

Jakob Feldtfos es el director de DIVERSIunity, una compañía que proporciona servicios de consultoría, herramientas, talleres y cursos en línea focalizados en diversidad, igualdad e inclusión para universidades, grupos de investigación y fuentes de financiación para la ciencia. En esta ponencia, la única del curso ofrecida en inglés dado el interés internacional, Jakob nos invita a reflexionar sobre la perspectiva de género tanto en ámbitos más cotidianos de la vida, como a la hora de escribir nuestros proyectos científicos. Los baremos de evaluación focalizados en la perspectiva de género se están aplicando ya en los concursos de proyectos nacionales e internacionales. Por ello, Jakob nos invita a seguir unos pasos a la hora de diseñar nuestros proyectos centrados en tres fases: antes (estudio de la literatura para identificar ciertos prejuicios basados en el género, tener una idea de la representación de género en nuestro campo), durante (examinar cómo el género puede influenciar en las maneras de abordar el foco de nuestra investigación, hacer un análisis de riesgos y beneficios basado en el género) y después (evaluar cómo nuestra investigación impacta social y económicamente a distintos géneros, definir cómo el género puede influenciar en el proceso de toma de decisiones, creación de protocolos y el uso de la astronomía). Por último, Jakob también menciona que debemos comenzar a enfocarnos en la interseccionalidad de las distintas categorías (género, etnia u origen racial, edad, estado

socioeconómico, orientación sexual y localización geográfica) ya que están interrelacionadas, y determinan las identidades y experiencias de cada persona.

SESIÓN 8. CÓMO SER UNA PERSONA ALIADA.

ORIOI RÍOS (URV)

Oriol Ríos es profesor titular del Departamento de Pedagogía de la Universitat Rovira i Virgili y responsable del grado de Educación Social de la misma universidad. En esta ponencia Oriol plantea la figura del 'bystander', u observador, en una situación de acoso o agresión, en particular en casos de desigualdad de género y/o acoso a la comunidad LGTBI+. Nos propone una serie de medidas para mejorar las actuaciones individuales y promover ambientes de trabajo y sociales más seguros. Oriol nos anima a aceptar el cambio de paradigma en las relaciones sociales y a permanecer siempre del lado de la víctima, tratando de prevenir situaciones de acoso y aprendiendo a modificar nuestras acciones. En particular impulsa a los hombres a aprender a abrazar nuevos tipos de masculinidades.

SESIÓN 9. PLANES DE IGUALDAD.

ISABEL LÓPEZ DE SILANES Y MANUELA FONTANEDA (CNIO)

Isabel López de Silanes, responsable de la Oficina de la Mujer del Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas (CNIO), destacó en su charla el compromiso del centro con la igualdad de género. El CNIO, un centro de referencia en investigación contra el cáncer con el 64% de su plantilla femenina, ha creado la Oficina de la Mujer para abordar la baja representación femenina en puestos de liderazgo. Esta oficina promueve la igualdad a través de la implementación de medidas que facilitan la conciliación de forma puntera respecto a lo que se hace en otros centros, o la organización de seminarios formativos, que coinciden con visitas educativas para fomentar la igualdad en las nuevas generaciones.

Manuela Fontaneda, directora de administración del CNIO, explicó el proceso de creación de un plan de igualdad, que consta de seis fases: compromiso, creación de una comisión negociadora, diagnóstico, negociación y elaboración del plan, implementación, y seguimiento y evaluación. Estas fases aseguran un enfoque organizado y adaptable para promover la igualdad de género. La conclusión de la ponencia es que es posible combinar la excelencia científica con un sólido plan de igualdad.

SESIÓN 10. TECHO DE CRISTAL.

EVA FERREIRA GARCÍA (UPV/EHU)

Eva Ferreira García, catedrática y rectora de la Universidad del País Vasco (UPC/EHU), nos habla del techo de cristal y de su experiencia personal como mujer que no solo ha hecho un amplio recorrido en la carrera académica, sino también que está ahora en una posición de liderazgo. En su intervención Eva subraya el hecho de que hoy en día hemos conseguido a nivel legal la paridad de género, pero los sesgos y los actos de "micromachismo" que siguen existiendo hacen que las mujeres continúen teniendo muchas dificultades en sus carreras científicas y en el acceso a puestos de liderazgo, que es donde más se nota el efecto de la tijera. Esos comportamientos sutiles son los que pueden llevar a la "erosión" de la confianza de las mujeres, y finalmente a truncar la carrera de muchas. Eva destaca también que la maternidad marca un punto de inflexión en la carrera de las mujeres, como ha demostrado también en sus trabajos la premio Nobel de economía, Claudia Goldin. Eva termina aconsejando a las mujeres que traten de no dejarse influenciar por los estereotipos de género y decidan sobre la propia carrera y la asunción de cargos de responsabilidad libremente, siguiendo su vocación.

SESIÓN 11. MUJER, INVESTIGADORA Y ASTRONAUTA.

SARA GARCÍA ALONSO (CNIO & ESA)

Sara García Alonso es investigadora titular del Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas (CNIO), biotecnóloga especializada en investigación en cáncer, y miembro de la reserva de Astronautas de la Agencia Espacial Europea (ESA). Sara explica su experiencia, en particular, a lo largo del proceso de selección de astronautas abierto por la ESA en 2021, con diversos tests cognitivos, psicométricos, pruebas médicas y entrevistas. A pesar de que de las 23000 personas que presentaron candidaturas válidas al principio del proceso solo el 24% eran mujeres, el proceso de evaluación fue ciego, y en la selección final casi el 50% fueron mujeres. En esta sesión relata también su trayectoria vital y académica, explicando las motivaciones que la han guiado y los retos que ha tenido que superar. Sara García Alonso sobresale en valentía, amabilidad, pasión y esfuerzo, características que la han ayudado y guiado en su trayectoria académica y espacial, y que suponen una fuente de inspiración tanto para



las investigadoras del presente como para las niñas que pueden ser las científicas del futuro.

Desde la Comisión de Mujeres y Astronomía agradecemos tanto a las personas ponentes como a aquellas que asistieron al curso por su participación, interés e implicación. La CMYA está muy satisfecha con la aceptación, acogida y participación que obtuvo el curso ya que el total de personas inscritas procedían de diferentes regiones españolas y distintos países, así como de diferentes especialidades y ramas científicas. De hecho, cada sesión mantuvo un promedio de participación por charla de 130 personas.

El éxito de este primer curso online en igualdad de género pone de manifiesto que cursos como este, focalizados en diversidad, igualdad e inclusión, son necesarios para formarnos como investigadoras e investigadores, pero sobre todo como personas. El impacto y la implementación de estas 'buenas prácticas' no sólo traerán aspectos positivos a nuestra investigación, sino que sobre todo permeabilizarán hacia nuestra sociedad, haciéndola un espacio más diverso, equitativo e inclusivo.



Comisión actual y pasada formada por: Beatriz Agís, Naiara Barrado, Silvia Bonoli, Ismael García, Marc Huertas, Maritza Lara, Elena Manjavacas, Nataly Ospina, Irene Pintos, Isabel Rebollido, Sara Rodríguez, Alicia Rouco, Jesús Varela y Alba Vidal.

Curso online de formación en igualdad de género en ciencia

2023

Organizado por la Comisión Mujer y Astronomía de la SEA



Un martes al mes a las 10:00 (CET)



Ilustradora: Eulogia Merle

Wang Zhenyi (Astrónoma)

24/01 Introducción: avances y desafíos para una igualdad en ciencia. *Zulema Altamirano (UMyC, MCINN).*

21/02 Educación universitaria con perspectiva de género. *Encina Calvo (USC) e Irene Epifanio (UJI).*

21/03 Sesgos subliminales en ciencia. *Lidia Puigvert (UB, CREA).*

18/04 Riqueza de género e identidad. *Eva Luna Díaz (Prisma).*

16/05 Lenguaje inclusivo. *María Martín Barranco (EveFEM).*

13/06 Acoso. *Lidia Puigvert (UB, CREA).*

04/07 Gender perspectives in research proposals. *Jakob Feldtfos (DIVERSlunity).*

19/09 Cómo ser una persona aliada. *Oriol Ríos (URV).*

17/10 Planes de igualdad. *Isabel López de Silanes y Manuela Fontaneda (CNIO).*

14/11 Techo de cristal. *Eva Ferreira García (UPV/EHU).*

12/12 Mujer, Investigadora y Astronauta. *Sara García Alonso (CNIO & ESA).*

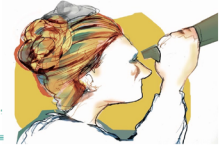


Más información en:

<https://www.sea-astronomia.es/comision-mujer-y-astronomia>

Curso online de formación en igualdad de género en ciencia 2023: un balance/informe

Alba Vidal-García, Julia Suso, Isabel Rebolledo, Marina Rodríguez Baras, Alicia Rouco, Jesús Varela, Beatriz Agís, Naiara Barrado, Silvia Bonoli, Elena Manjavacas, Nataly Ospina, Irene Pintos Castro



Introducción

Durante el año 2023 la Comisión Mujeres y Astronomía de la SEA organizó un curso online sobre género e inclusión en ciencia, con el objetivo de concienciar y dar herramientas específicas sobre diversas facetas de la desigualdad de género en el ámbito científico.

El curso estuvo compuesto por 11 seminarios online, que se impartieron mensualmente a lo largo de 2023 sobre los temas que aparecen en el cartel, con una duración de 1h30min cada sesión. Se entregó, además, un certificado de asistencia a aquellas personas que atendieron un 72% del curso.

Curso online de formación en igualdad de género en ciencia 2023

Organizado por la Comisión Mujer y Astronomía de la SEA

Un martes al mes a las 10:00 (CET)

Wang Zheng (Japón)

2401 Introducción: avances y desafíos para una igualdad en ciencia. Zuzanna Adamiano (UMyC, MCINN)

2102 Educación universitaria con perspectiva de género. Ercina Calvo (UC3) e Irene Espinosa (UB)

2103 Sesgos subliminales en ciencia. Lidia Pulver (UB, CREA)

1804 Riqueza de género e identidad. Eva Luna Diaz (Phismas)

1605 Lenguaje inclusivo. María Martín Barrio (EAFEM)

1306 Acoso. Lidia Pulver (UB, CREA)

0407 Gender perspectives in research proposals. Jacob Fawcett (DIVERStunity)

1809 Cómo ser una persona aliada. Oriol Rius (URV)

1710 Planes de igualdad. Isabel López de Silanes y Mariana Fontrodona (CNIO)

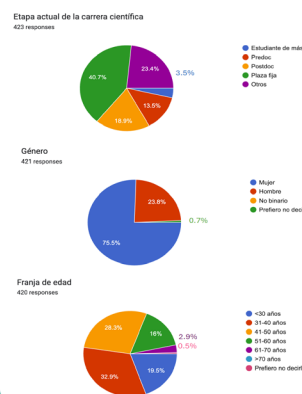
1411 Techo de cristal. Eva Ferrera García (OPV2020)

1212 Mujer, Investigadora y Astronauta. Sara García Alonso (CNIO & ESA)

Más información en: <https://www.sea-astronomia.es/comision-mujer-y-astronomia>

Demografía de las personas inscritas

El curso fue un éxito ya que se inscribieron 423 personas. Desglosamos a continuación los porcentajes de los datos sobre la etapa de la carrera científica, género y franja de edad:



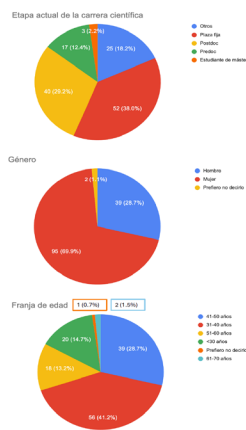
El 76.6% de las personas estaban desarrollando una carrera académica. De éstas, un 53.1% tenían plaza fija, un 24.7% eran postdoc, un 17.6% predoc y un 4.6% estudiantes de master. El resto (99 personas) realizaban diversos trabajos científicos fuera de la academia.

El 75.5% de las personas inscritas al curso eran mujeres, un 23.8% hombres y un 0.7% prefirieron no decirlo. No hubo personas no binarias entre las inscripciones.

En cuanto a la edad, la mayoría fueron personas de 31-50 años (61.2%), seguidas por personas de menos de 30 años (19.5%) y con un 18.9% de más de 50 años.

Demografía de las personas que han completado el curso

El curso lo completaron un total de 137 personas, a las que se les envió un certificado de asistencia. También se ha analizado demográficamente este grupo.



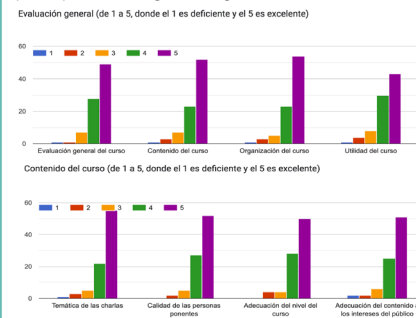
El porcentaje mayor tenía plaza fija, seguido por postdocs, predocs y estudiantes de master. Sin embargo si nos fijamos dentro de cada etapa de la carrera, la que ha tenido un mayor número de asistencia completa ha sido el postdoctorado con 40 de las 80 inscripciones, seguida de las personas con plaza fija (52/172), predocs (17/57) y estudiantes de master (3/15).

El 69.9% de personas que completaron el curso eran mujeres y un 28.7% hombres. Si comparamos con los números de las inscripciones, esto hace un total de 29.9% de éxito para las mujeres frente a un 39% para los hombres. Igualmente, 2 de las 3 personas que marcaron que preferían no especificar el género han completado el curso.

En cuanto a la edad, la mayoría de las personas que completaron el curso tenían entre 30 y 50 años (69.3%), seguidas por las de menos de 30 (14.7%) y por último las mayores de 50 (14.6%). Esto implica un porcentaje de éxito de 37% para la gente con una edad comprendida entre 30 y 50 años, un 25.3% para la gente de más de 50 y un 24.4% para la gente de menos de 30.

Resultados de la encuesta final

Al finalizar el curso se envió una encuesta para recolectar la opinión de las personas inscritas. Se recibieron un total de 86 respuestas de las cuales la mayoría (68.6%) vinieron de personas que habían asistido a 9 o más charlas.



Al menos la mitad de las personas marcaron la casilla excelente a las casillas de evaluación general, contenido, organización y utilidad del curso.

Al menos 50 de las 86 respuestas en cuanto al contenido fueron también "excelente".

Se preguntó con respuesta opcional qué temas habían resultado más útiles y/o interesantes y de las 33 respuestas obtenidas las que aparecen más veces nombradas son la de "Lenguaje inclusivo" (12), la de "Sesgos subliminales en ciencia" (11), la de "Acoso" (9) y las sesiones "Educación universitaria con perspectiva de género", "Mujer, Investigadora y Astronauta" y la respuesta "todas", con 5 votos cada una.

Conclusiones

- De las 423 personas inscritas, la mayoría (76.6%) estaban desarrollando una carrera académica y, de éstas, el 53.1% tenían plaza fija. Sin embargo, fijándonos en las personas que han completado el curso y a pesar de haber sido la mayoría de este grupo, el grupo con mayor porcentaje de éxito ha sido el de postdocs, con un 50% de los inscritos superando el curso.
- La inscripción del curso fue mayoritariamente femenina (75.5%) y también lo ha sido el de las personas con asistencia completa (69.9%). En cambio, fijándonos en el porcentaje de éxito han sido los hombres los que han conseguido un mayor porcentaje de completitud del curso (un 39% de los inscritos frente a un 29.9% de las inscritas).
- Tanto la mayoría de personas inscritas como de personas que han superado el curso tenían entre 30 y 50 años (61.2% y 69.3% respectivamente), seguidas por las de menos de 30 (19.5% y 14.7%) y las de más de 50 (18.9% y 14.6%). Sin embargo el porcentaje de éxito ha sido mayor para la gente de más de 50 años que la de menos de 30.
- De las 86 respuestas de evaluación del curso marcaron la casilla "excelente" a la evaluación general al menos la mitad y a la evaluación del contenido lo hicieron, al menos 50. Además las sesiones que más gustaron incluyen la de "Lenguaje inclusivo", "Sesgos subliminales en ciencia" o "Acoso".

Curso publicado

Todo el material del curso se ha publicado en la página web de la comisión y hay tanto acceso a los videos como a las transparencias de las ponencias. Próximamente añadiremos a la página además la recopilación del material y los recursos que se proporcionaron en las charlas.



En esta sección de nuestro Boletín pretendemos mostrar la cara más social de los miembros de nuestra sociedad: entradas y salidas de comités, nombramiento de nuevos directores de centros, cambios de afiliaciones, jubilaciones, premios, etc. Si cuando acabéis de leer la sección pensáis "Podían haber hablado también de..." os pedimos que nos enviéis vuestra entrada para incluirla en el próximo número. Gracias.

LOURDES VERDES-MONTENEGRO GALARDONADA CON LA MEDALLA MARGARITA SALAS

Lourdes Verdes-Montenegro (IAA-CSIC) ha sido galardonada con la Medalla Margarita Salas 2023 a la mejor trayectoria en supervisión de personal investigador. Con este reconocimiento del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, se reconoce la relevancia de su contribución a la supervisión y dirección de personal investigador que inicia o desarrolla su carrera científica.

LICIA VERDE RECIBE LA MEDALLA DE LA REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA

Licia Verde, directora científica del Instituto de Ciencias del Cosmos de la Universidad de Barcelona (IC-CUB), ha sido galardonada con la Medalla de la Real Sociedad Española de Física "por su excelente carrera científica en el campo de la cosmología, habiendo realizado contribuciones relevantes en el estudio del origen, composición y evolución del Universo".

MAR CARRETERO, PREMIADA POR LA VANGUARDIA

Y otra investigadora del Instituto de Ciencias del Cosmos de la Universidad de Barcelona (IC-CUB), Mar Carretero, ha logrado en este caso un muy meritorio tercer puesto en la convocatoria de 2024 del Premio Vanguardia de la Ciencia, un galardón que otorgan los lectores de este periódico anualmente y cuyo objetivo es reconocer proyectos de investigación liderados por mujeres.

PROPUESTA DE UN NUEVO ODS EN EL SENADO

En una jornada organizada por la Fundación Starlight y la Asociación de Mujeres Empresarias, Directivas y Profesionales de Canarias (BPW Canarias), se presentó el pasado 19 de septiembre ante el Senado la propuesta de un nuevo objetivo de desarrollo sostenible (ODS): el ODS 18 para la protección del cielo nocturno. El acto fue coordinado por nuestra compañera Antonia Valera, directora de la Fundación Starlight y presidenta de BPW Canarias.

RELEVO EN LA COMISIÓN MUJER Y ASTRONOMÍA

La más activa de las comisiones de la SEA cambia de coordinadora. Alicia Rouco Escorial (ESA) ha sido elegida por unanimidad por la Comisión como nueva coordinadora, reemplazando a Marina Rodríguez Baras (OAN), que ha agotado los tres años establecidos para este puesto en los estatutos. En su anuncio, la Comisión afirma que "es un cambio de organización pero no de espíritu: seguiremos trabajando intensamente por avanzar hacia la igualdad de género, la inclusión y la diversidad en la comunidad astronómica española y en toda la sociedad".

IN MEMORIAM, LUIS CUESTA CRESPO Y ROBERT ESTALELLA

Con gran tristeza hemos despedido este semestre a dos miembros de nuestra comunidad: Luis Cuesta Crespo y Robert Estalella. Luis realizó su tesis doctoral en el Instituto de Astrofísica de Canarias, dedicándose a la divulgación y comunicación de la astronomía en el Centro de Astrobiología, siendo su último destino el Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón. Robert, distinguido Catedrático emérito de Astronomía y Astrofísica de la Universitat de Barcelona, dedicó su vida académica a la formación de numerosas generaciones de astrónomos y astrónomas y fue uno de los pioneros en el campo de la radioastronomía en España. Descansen en paz.

SO LONG, AND THANKS FOR ALL... THE PROPELLENT!

El próximo 15 de enero de 2025 se pondrá fin a las observaciones científicas nominales del satélite Gaia, tras más de una década (¡parece que fue ayer!) de observaciones continuas de nuestra Galaxia. El motivo es que se está agotando el gas propelente que mantiene su giro estable y le permite el barrido continuo del cielo. El destino final de Gaia es abandonar L2 y entrar en una órbita heliocéntrica, alejándose de la Tierra. Pero su legado definitivo aún tardará un poco: el catálogo final RD5 está previsto que se publique en 2030.

CIELOS DE PIEDRA

A. César González García

ISBN: 978-84-16725-40-3

Editorial: JAS Arqueología

Todos nos quedamos extasiados frente a un cielo estrellado lejos de fuentes de luz contaminante. Sin palabras estamos ante la oscuridad del cielo como un profundo insondable, el centelleo de las estrellas cubriendo el firmamento como una miríada de joyas derramadas en el inmenso tapiz celestial, mientras la Vía Láctea, como columna vertebral de la bóveda celeste, recorre el cielo de extremo a extremo. Frente a esta visión poética, la ciencia actual nos permite explicar cada uno de los fenómenos de manera racional.

Hace miles de años las sociedades humanas quedaban igualmente maravilladas frente al cielo estrellado, pero veían en las estrellas y en los planetas sus propias deidades, que vigilaban desde el firmamento. Las civilizaciones antiguas situaban a sus dioses en la esfera celeste y de allí surgieron mitos y mitologías. Las culturas del pasado siguieron los movimientos de los astros con sumo interés, también por una cuestión práctica, para la agricultura o la confección de los primeros calendarios. Esto lo conocemos por sus escritos, sus tabletas de arcilla, sus papiros y sus esculturas y monumentos.

¿Pero qué pasa cuando la documentación que dejaron las civilizaciones antiguas es escasa, o inexistente? ¿Cómo conocer cuáles eran sus creencias y su relación, si la tuvieron, con el cielo?

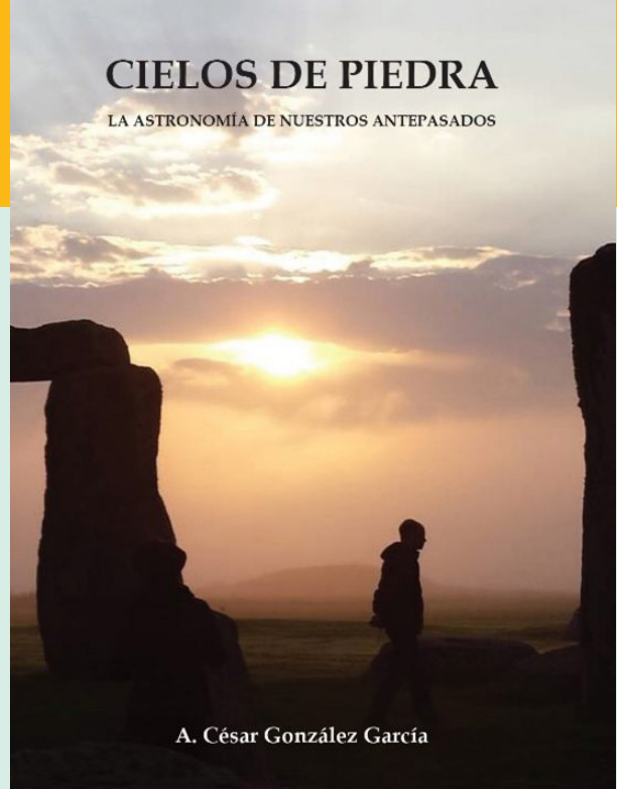
En este caso, de las obras que dejaron aquellos lejanos humanos, como monumentos, edificios, ciudades, cuevas o abrigos, solo las que perviven nos pueden dar alguna información al respecto. Pero también las tradiciones que se han transmitido de generación en generación de forma oral permiten obtener datos de aquellas civilizaciones.

La arqueoastronomía es la disciplina que estudia este campo, como un área de contacto entre antropología, arqueología, historia de las religiones y la astronomía. Cada una de estas áreas de conocimiento aporta aspectos valiosos y complementarios para poder entender correctamente la visión del mundo de culturas desaparecidas sin documentación escrita y qué relación tenían con el cielo.

Hasta no hace mucho la interpretación de la función de una construcción antigua se hacía únicamente a partir de su orientación astronómica hacia determinadas salidas o puestas del Sol o de la Luna. Actualmente la moderna arqueoastronomía detalla que una visión puramente astronómica no es suficiente para interpretar el uso de un templo o construcción antigua, sino que es necesario además interpretarla en su contexto social y cultural.

CIELOS DE PIEDRA

LA ASTRONOMÍA DE NUESTROS ANTEPASADOS



A. César González García

Es lo que ha pasado con el más famoso monumento de piedra, Stonehenge, monumento megalítico tipo crómlech, construido entre el final del Neolítico y principios de la Edad del Bronce, situado cerca de Salisbury, Inglaterra. Muy estudiado, únicamente como observatorio astronómico neolítico, actualmente se resalta sobre todo su carácter funerario y de peregrinación.

El astrónomo A. César González nos presenta en su libro Cielos de piedra. La astronomía de nuestros antepasados, los aspectos de este nuevo enfoque, de esta astronomía cultural. Para ello nos muestra numerosos ejemplos de monumentos de culturas antiguas desaparecidas en los que los astros y sus movimientos han jugado un papel fundamental en su construcción y en los que sus mitos han quedado grabados en la piedra.

Tradicionalmente, la orientación de los monumentos antiguos se consideraba determinante, si la mayoría de ellos se orientaban de manera similar. Actualmente se considera que esto no es suficiente, ya que es necesario no olvidar que cualquier yacimiento está situado en un entorno determinado que debe ser estudiado para su comprensión adecuada. Es lo que se denomina arqueología del paisaje.

Así que la arqueoastronomía, en contacto con diversas áreas científicas, trata de poner en su contexto, con la ayuda de la orientación, paisaje, tradiciones, documentación si la hay, cómo veían los astros las antiguas civilizaciones y qué uso les daban.

Finalmente cabe destacar que el libro nos describe una auténtica ciencia de la cultura, de manera rigurosa y apoyada en estudios serios astronómicos y etnográficos, lejos de los trabajos superficiales de yacimientos realizados por aficionados bienintencionados. Los trabajos de campo han de hacerse de forma rigurosa y huyendo de especulaciones que puedan llevar a resultados quizá llamativos, pero totalmente falsos.

Enric Marco
Departament d'Astronomia i Astrofísica
Universitat de València

El experimento QUIJOTE: análisis de separación de componentes con datos del MFI y resultados del comisionado del TFGIs

Autor: Mateo Fernández Torreiro
(mateo@fernandeztorreiro.com)

Tesis doctoral dirigida por: José Alberto Rubiño Martín y Rafael Rebolo López

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC)

Fecha de lectura: 13 de noviembre de 2023

Tras los despliegues de los satélites WMAP y *Planck* cobran fuerza dos motivaciones entre la comunidad científica centrada en el estudio del Fondo Cósmico de Microondas (CMB) de cara a futuros experimentos. La primera es una mayor atención en la componente polarizada del CMB, ya que la detección de los modos-B de dicha componente tendría importantes implicaciones cosmológicas (principalmente, la presencia de ondas gravitacionales primordiales durante la época inflacionaria de nuestro Universo). La segunda es la correcta caracterización de los llamados *foregrounds* del CMB, aquellas señales astrofísicas coincidentes con este en el espectro electromagnético y que entorpecen su detección.

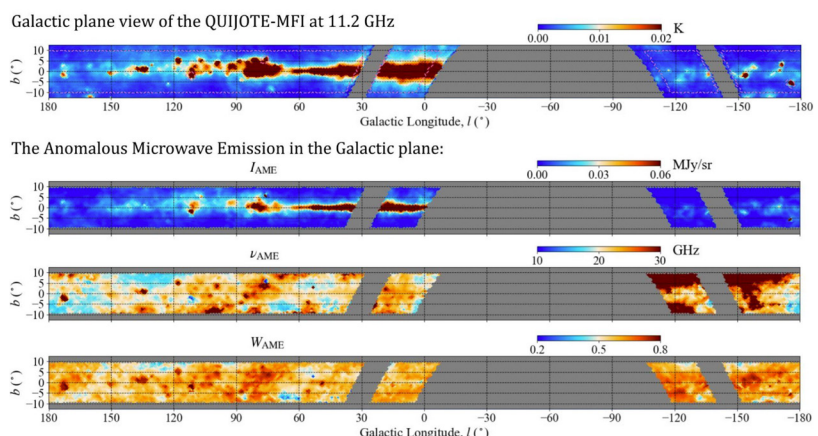
Cada uno de estos puntos se puede relacionar con los dos primeros instrumentos instalados en el experimento Q-U-I JOint Tenerife Experiment (QUIJOTE): el Multi Frequency Instrument (MFI) y el Thirty-and-Forty Gigahertz Instrument (TFGI). El MFI estuvo instalado en el Observatorio del Teide (OT) entre 2012 y 2018, observando el cielo entre 10 y 20 GHz a escalas de un grado. En este rango espectral se solapan tres de los principales *foregrounds* del CMB: las emisiones sincrotrón, libre-libre y anómala de microondas (AME). El MFI es el único instrumento que ha observado el cielo completo en este rango espectral, por lo que sus datos en la caracterización de estos *foregrounds* resultan de gran importancia. Por su parte, el TFGI está instalado en el OT desde 2019, y observa el cielo a 31 y 41 GHz con una resolución de ~ 20 arcmin. En este caso, el TFGI se centra en el estudio con alta sensibilidad de campos cosmológicos. Al igual que el MFI (y al contrario que WMAP o *Planck*) el TFGI está centrado en la medición de la componente polarizada del CMB, y por diseño minimiza significativamente la contribución del ruido $1/f$.

En esta tesis utilizamos los datos del MFI junto con un nuevo

método de separación de componentes para obtener mapas de los parámetros que describen los *foregrounds* del CMB a lo largo del plano Galáctico ($|b| < 10^\circ$). En total se han obtenido diez mapas distintos asociados a dichos parámetros. La AME todavía no se ha conseguido caracterizar totalmente dentro de la literatura, por lo que aquellos parámetros que la describen se discuten en mayor detalle. Hemos encontrado que el mejor trazador de la AME es la radianza del polvo, y que la AME correla de forma más importante tanto con los granos pequeños (< 1 nm) y grandes (> 10 nm) de polvo, mientras que la correlación con aquellos de tamaños intermedios (1-10 nm) no es tan buena. Por lo tanto, resulta menos probable que estos últimos sean los responsables de la AME. También encontramos que la cantidad de AME esperada disminuye significativamente cuando los datos del MFI no se utilizan en el análisis: ello prueba la importancia de contar con datos en esta zona del espectro, como los que proporciona QUIJOTE-MFI, a fin de evitar sesgos. También hemos utilizado cerca de 600 horas de observación de la galaxia de Andrómeda (M31) por parte del MFI para intentar caracterizar una componente extragaláctica de AME. Recuperamos dicha componente con una significación mayor que 3σ , mientras que distintos tests estadísticos muestran una importante preferencia por aquellos modelos que consideran la AME. Hemos encontrado además que el cociente entre la AME y la emisión térmica del polvo es similar en ambas galaxias, lo que sugiere un comportamiento de la AME similar entre M31 y la Vía Láctea. Además, por primera vez se ha obtenido una cota para la polarización de la AME en un objeto extragaláctico ($\leq 40\%$). Finalmente, en esta tesis presentamos el comisionado del TFGI, con datos tomados entre 2021 y 2022 con siete (de 29) píxeles instalados en el instrumento. Se ha preparado el modelo de apuntado del instrumento, con una precisión < 1 arcmin, al tiempo que se han caracterizado los haces, siendo sus anchuras a media altura (FWHM) consistentes con las esperadas: 22 y 18 arcmin (a 31 y 41 GHz, respectivamente). Se ha establecido un modelo de la ganancia mes a mes, ya que se han detectado variaciones temporales significativas, con un incertidumbre total en torno al 10%. La sensibilidad instantánea también ha sido estimada a partir de observaciones de Tau A, alcanzando unos valores por píxel de 0,75–1,5 mK/vs y 0,25–0,5 mK/vs en intensidad y polarización, respectivamente. A partir de las observaciones de verificación científica realizadas en las regiones del Cisne y W44, alcanzamos sensibilidades en polarización de 8–10 $\mu\text{K deg}^{-1}$. Al extrapolar este resultado, encontramos que para un campo cosmológico típico de 1200–1300 deg^2 alcanzaríamos un nivel de 1 $\mu\text{K deg}^{-1}$ tras ~ 3000 horas de observación (1 año asumiendo una eficiencia de un 30%), una vez los 29 detectores estuvieran instalados. Con esta sensibilidad sería posible establecer una cota en la ratio entre los modos-B y modos-E del CMB, r , de $< 0,05$. Será la primera vez que un experimento en el Hemisferio Norte alcance tal precisión.

Tesis disponible en: <https://www.educacion.gob.es/teseo/mos-trarRef.do?ref=2478447>

Arriba: el plano Galáctico visto por el instrumento QUIJOTE-MFI a 11.2 GHz. Abajo: los mapas reconstruidos de los parámetros (amplitud, frecuencia de pico y anchura espectral) que describen la emisión Anómala de Microondas (AME).



Explorando el ciclo bariónico de las galaxias a través del análisis de poblaciones estelares

Autora: Laura Scholz Díaz

Tesis doctoral dirigida por: Ignacio Martín Navarro y Jesús Falcón Barroso

Centro: Instituto de Astrofísica Canarias y Universidad de La Laguna

Fecha de lectura: 9 de mayo de 2024

Como primera aproximación, el crecimiento de los halos de materia oscura es el principal motor de la formación de galaxias en nuestro modelo cosmológico estándar. Sin embargo, procesos bariónicos complejos y altamente no lineales toman el control en los centros de estos halos, dando lugar a la diversidad de galaxias que observamos en el Universo hoy en día. El acoplamiento entre la física bariónica y la materia oscura es fundamental para nuestra comprensión de las galaxias y, sin embargo, sigue siendo un desafío tanto para modelos teóricos como para trabajos observacionales. Particularmente, si, cómo y por qué las propiedades observadas de galaxias están influenciadas por las propiedades de sus halos de materia oscura siguen siendo preguntas abiertas en el campo. El objetivo principal de esta tesis es explorar la formación y evolución de las galaxias en su contexto y entorno cosmológico, respondiendo a estas preguntas fundamentales observacionalmente, principalmente a través del análisis de poblaciones estelares. Las poblaciones estelares dentro de galaxias son registros fósiles que contienen información sobre su pasado evolutivo, que tradicionalmente solo se han estudiado en términos de propiedades bariónicas. Nuestro trabajo combina medidas detalladas de poblaciones estelares con diferentes caracterizaciones de halos para investigar el papel que tienen los halos de materia oscura en la modulación de las propiedades observadas y de relaciones de escala claves de galaxias en el Universo local.

Hemos investigado cómo las propiedades de las poblaciones estelares y las historias de formación estelar dependen de la masa del halo para las galaxias centrales del gran cartografiado espectroscópico SDSS. Mapeamos las edades y las metalicidades de las galaxias a lo largo de la relación de escala entre la masa estelar y la masa del halo y sobre la relación entre la dispersión de velocidades y la masa del halo, utilizando sus espectros ópticos de absorción. Descubrimos que estos observables correlacionan con la dispersión de ambas relaciones, pero la dispersión de velocidad es un mejor predictor de estas propiedades que la masa estelar. Lo más interesante es que nuestros hallazgos indican que, para una masa estelar o una dispersión de velocidades dada, las galaxias tienen diferentes poblaciones estelares según la masa de sus halos anfitriones. Las galaxias en halos menos masivos son más viejas y más ricas en metales a una masa estelar fija, y también encontramos que forman la mayor parte de sus estrellas temprano y en períodos cortos de tiempo según sus historias de formación estelar. Además, introdujimos un nuevo enfoque observacional utilizando galaxias del cartografiado de espectroscopía de campo integral CALIFA para evaluar el papel de la masa total dinámica como una métrica alternativa sensible a su contenido de materia oscura. Estas masas totales se derivan a través de un detallado modelado dinámico de Jeans de la cinemática estelar de las galaxias, e incorporan tanto una componente

estelar como una de materia oscura para poder reproducir los movimientos estelares. Además de las poblaciones estelares, también investigamos el momento angular estelar, las tasas de formación estelar y la morfología de las galaxias a lo largo de la relación de escala entre la masa estelar y la masa total dinámica. De manera similar a la relación entre la masa estelar y la masa del halo, observamos que todas estas propiedades de las galaxias, sensibles a diferentes escalas de tiempo del proceso de formación de galaxias, dependen tanto de la masa estelar como de la masa total, con estas dos cantidades habiendo sido derivadas de manera completamente independiente. Las galaxias se vuelven más viejas, más ricas en metales y menos soportadas por rotación, tienen menores tasas de formación estelar y morfologías de tipo temprano a medida que disminuye su masa total, a una masa estelar fija.

Además, investigamos el origen de la relación de escala entre las tasas globales de formación estelar y las masas estelares de las galaxias, la secuencia principal de formación estelar. Exploramos la conexión entre la dispersión de esta relación y las historias de formación estelar para galaxias centrales de SDSS, utilizando sus espectros ópticos de absorción. Observamos que, para una masa estelar dada, las galaxias han experimentado diferentes historias de formación estelar según sus tasas de formación estelar actuales. Las galaxias con tasas de formación estelar más altas hoy en día tienen historias de formación estelar más extendidas, mientras que las que tienen tasas de formación estelar más bajas han formado la mayor parte de sus estrellas más temprano y más rápido.

Interpretamos nuestros resultados en el contexto de la evolución de los halos de materia oscura a lo largo del tiempo cósmico. Especulamos que los tiempos de formación de los halos son el origen de las tendencias observadas a lo largo de la relación entre la masa estelar y la masa del halo, la relación entre la masa estelar y la masa total dinámica y la secuencia principal de formación estelar, con la dispersión de estas relaciones mapeando galaxias/halos en diferentes etapas evolutivas.

Además, investigamos si las simulaciones cosmológicas hidrodinámicas numéricas a gran escala pueden reproducir la relación fundamental de la metalicidad observada localmente, es decir, la anti-correlación entre las metalicidades del gas y las tasas de formación estelar observadas en galaxias de baja masa a escalas locales. Generamos mapas resueltos espacialmente de la metalicidad del gas y tasa de formación estelar para galaxias espirales de EAGLE. Las galaxias de baja masa muestran que regiones con bajas tasas de formación estelar tienen altas metalicidades del gas, mientras que esta tendencia se invierte para galaxias masivas, en acuerdo con observaciones espectroscópicas de campo integral. Por último, también exploramos el origen del gas que alimenta la formación estelar en las galaxias de EAGLE en dos épocas cósmicas, el día de hoy y el mediodía cósmico, rastreando el gas que forma estrellas y las estrellas formadas recientemente hacia atrás en el tiempo. La mayoría del gas que sostiene la formación estelar en las galaxias en ambas épocas ya estaba en las galaxias aproximadamente un gigaño antes de la formación estelar. Encontramos que la contribución del gas acretao proveniente de fusiones de galaxias aumenta al mediodía cósmico con respecto al día de hoy. Sin embargo, la contribución del gas de origen cosmológico (por ejemplo, de fusiones con halos oscuros y luminosos) es relevante para las galaxias de baja masa hoy en día, mostrando que la acreción de gas cosmológico es una fuente importante para alimentar la formación estelar en estos halos de baja masa no solo en el Universo temprano.

Tesis disponible en: <https://www.educacion.gob.es/teseo/implimirFichaConsulta.do?idFicha=839524>

Explotando el ultravioleta cercano como herramienta de diagnóstico de composición en el material primitivo del Sistema Solar

Autor: Fernando Tinaut Ruano
(1b.ftinaut@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Julia de León Cruz y Eri Tatsumi

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias y Universidad de La Laguna

Fecha de lectura: 11 de junio de 2024

Los asteroides son los restos de la formación planetaria en el Sistema Solar, por lo que su estudio nos ayuda a entender las condiciones en las primeras etapas de formación de nuestro sistema planetario. Los asteroides primitivos son aquellos con espectros similares a los de las condritas carbonáceas, ricos en compuestos de carbono, orgánicos, y silicatos alterados por la presencia de agua líquida (filosilicatos). Los asteroides primitivos están bien caracterizados en diversas regiones del espectro, mostrando su absorción más diagnóstica en la región de las $3\ \mu\text{m}$. Sin embargo existe una escasez de información sobre la región del ultravioleta cercano (NUV, entre $0,35$ y $0,5\ \mu\text{m}$) debido, entre otras cosas, a la baja sensibilidad de los detectores CCD y a la absorción de la atmósfera terrestre en estas longitudes de onda. A pesar de todo esto, el NUV ha sido propuesto en estudios de laboratorio anteriores como candidato para proporcionar información composicional.

Así pues, el objetivo de esta tesis doctoral es explorar el potencial del NUV como herramienta de caracterización de material primitivo en el Sistema Solar. Para ello hemos usado datos espectroscópicos y espectrofotométricos desde telescopios terrestres y espaciales que proporcionan información en este rango de longitud de onda, resultando un estudio sistemático de esta región en distintos ambientes y escalas en el Sistema Solar.

Esta tesis es un compendio de cuatro artículos y un capítulo no publicado. En primer lugar hemos inspeccionado imágenes de la superficie del planeta enano Ceres tomadas por la sonda Dawn de NASA. El equipo perteneciente a esta misión nos facilitó los datos sobre pendientes espectrales en toda su superficie, incluyendo la región del NUV. Esto nos permitió hacer un estudio extensivo de su superficie llegando a la conclusión de que las variaciones espectrales en el visible estaban correlacionadas con la edad de la superficie, mientras que la dispersión en los datos no nos permitió confirmar una correlación similar para el NUV. Tras este primer contacto con material primitivo, realizamos un estudio espectroscópico de dos familias colisionales de asteroides, también primitivos. Estas son: el complejo Polana-Eulalia y la familia Themis. Para ello obtuvimos espectros hasta $0,35\ \mu\text{m}$ utilizando telescopios localizados en el Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma, España) y revisamos datos ya publicados. En este estudio también detectamos que algunas estrellas clasificadas como análogas solares en el rango visible e infrarrojo cercano ($0,5$ - $2,5\ \mu\text{m}$) introducían una pendiente en el NUV. Tras pro-

poner un método para corregir esta pendiente y corregir los datos ya existentes concluimos, entre otras cosas, que no hay diferencias apreciables en la absorción del NUV entre los miembros de Polana y los de Eulalia. Además, están en buen acuerdo con la absorción en los asteroides primitivos visitados por sondas recientemente Ryugu y Bennu, cuyo origen más probable es el complejo Polana-Eulalia.

En junio de 2022 se hizo público el catálogo Gaia DR3 con 60 000 asteroides observados en el NUV. Esto nos ofreció una gran oportunidad para inspeccionar esta región sobre una gran cantidad de asteroides. Concienciados del mal funcionamiento de algunas análogas solares en el NUV, decidimos revisar la muestra de estrellas utilizadas en el catálogo de Gaia para generar los espectros de los asteroides, descubriendo que estaban afectando a la pendiente espectral por debajo de $0,5\ \mu\text{m}$. Tras cuantificar y corregir este efecto pudimos explorar el catálogo, encontrando resultados nuevos para la comunidad: (i) una correlación entre la absorción en el UV y la única absorción que podemos encontrar en el visible para asteroides primitivos, una banda débil a $0,7\ \mu\text{m}$, relacionada con minerales hidratados ricos en hierro; (ii) dos grupos de asteroides diferenciados por la longitud de onda donde comienza la absorción en el UV; (iii) haciendo uso del NUV en algoritmos de reducción dimensional encontramos una separación entre los asteroides primitivos con banda en $0,7\ \mu\text{m}$ y aquellos que no muestran dicha banda. Por otro lado, hemos confirmado resultados de trabajos anteriores usando una muestra mucho mayor.

Finalmente estudiamos la superficie de Japeto, un satélite regular de Saturno cuya bimodalidad en albedo ha causado controversia desde hace décadas. Es la mayor del Sistema Solar, con un hemisferio de material oscuro y otro cubierto de hielo. Usando imágenes de alta resolución espacial de la sonda Cassini, encontramos dos poblaciones de material primitivo en su superficie, diferenciadas por la absorción en el NUV. En este trabajo proponemos dos orígenes distintos para estas poblaciones. Una de ellas parece pertenecer a la litosfera de Japeto, mientras que la otra tiene un origen exógeno. Además, la población exógena muestra una correlación entre la absorción en el UV y la banda de absorción en $3\ \mu\text{m}$. Esta última contiene mucha información relacionada con la presencia de minerales hidratados y compuestos orgánicos.

Los resultados de esta tesis constituyen las primeras evidencias observacionales de la capacidad del NUV como herramienta de caracterización de los materiales primitivos, remarcando el papel crucial que toma la absorción en el UV para la identificación de dicho material en el Sistema Solar. Nuestros resultados serán especialmente relevantes para las próximas liberaciones de datos de Gaia, para la interpretación de las primeras observaciones de asteroides primitivos a $3\ \mu\text{m}$ con el JWST y para remarcar la importancia de observar el UV en futuros estudios de materiales primitivos.

Tesis disponible bajo solicitud por correo: 1b.ftinaut@gmail.com

Análisis de cúmulos de galaxias modelados teóricamente

Autora: Ana Contreras Santos
(ana.contreras@uam.es)

Tesis doctoral dirigida por: Alexander Knebe
Centro: Universidad Autónoma de Madrid
Fecha de lectura: 18 de junio de 2024

Los cúmulos de galaxias son las estructuras conocidas ligadas gravitacionalmente más grandes del Universo, con masas de hasta unas 10^{15} masas solares. Dentro del modelo jerárquico de formación de estructuras, los cúmulos están en la cúspide de la jerarquía. Su crecimiento y evolución se han producido a través del colapso de regiones inicialmente más densas y la posterior acreción de material y procesos de fusión con otros sistemas. Por consiguiente, el estudio de cúmulos de galaxias proporciona conocimientos valiosos sobre los procesos de formación de estructuras a gran escala en el Universo, lo que los convierte en pruebas cosmológicas indispensables. Los cúmulos también ofrecen un entorno excelente para investigar la formación y evolución de galaxias, a partir de los distintos procesos astrofísicos que tienen lugar en su interior. Desde una perspectiva teórica, debido a la gran complejidad que subyace en su evolución, la mejor manera de modelar los cúmulos de galaxias es mediante simulaciones numéricas. Las simulaciones hidrodinámicas, en particular, siguen el comportamiento de la materia oscura, las estrellas y el gas resolviendo numéricamente las ecuaciones correspondientes. Esto permite un estudio detallado de cómo los cúmulos de galaxias y su contenido evolucionan de forma natural dentro del contexto más amplio de la red cósmica.

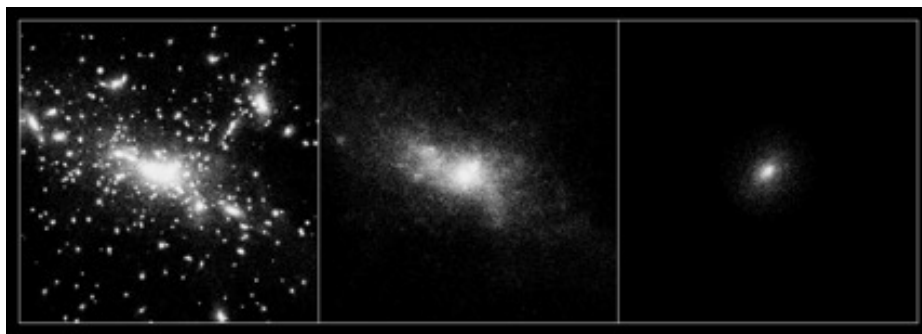
En esta tesis utilizamos un conjunto de simulaciones cosmológicas del proyecto THE THREE HUNDRED. Esta colección de datos consta de 324 resimulaciones hidrodinámicas de halos del tamaño de cúmulos y las regiones de radio 15 h-1Mpc que los rodean. Estas regiones, tomadas de una simulación previa con solo materia oscura, han sido resimuladas con diferentes códigos hidrodinámicos e implementaciones de física por debajo de la resolución de la simulación, permitiendo la identificación y el análisis de las diversas estructuras.

A lo largo de los diferentes capítulos de la tesis, utilizamos estas simulaciones para estudiar distintos aspectos de los cúmulos de galaxias. Comenzamos analizando las fusiones de cúmulos de galaxias dentro de su historia de acreción de masa, identificando las fusiones como aumentos significativos de masa que se producen en un periodo breve de tiempo.

Utilizando indicadores teóricos, medimos el estado dinámico de los cúmulos en torno al momento de las fusiones y, basándonos en esto, definimos una fase de fusión, durante la cual el estado del cúmulo se ve afectado por la fusión. A continuación, investigamos las galaxias más brillantes de los cúmulos que se fusionan. Comparando las propiedades antes y después de la fusión, mostramos cómo crecen principalmente por acreción de estrellas, con una pequeña contribución de un estallido de formación estelar inducido por la fusión, que afecta a la luminosidad y el color de las galaxias centrales.

El segundo enfoque tomado en la tesis involucra a la población de galaxias dentro de las regiones simuladas y, en particular, a las parejas de galaxias cercanas. Nuestro estudio se centra en comprobar si las parejas observadas están próximas también físicamente, así como si están ligadas gravitacionalmente. En cuanto al primer propósito, mostramos que seleccionar las parejas de galaxias en base a la masa estelar, metalicidad, color, forma y relación masa estelar-masa del halo de las galaxias implicadas puede mejorar significativamente la probabilidad de que las parejas observadas estén también próximas en distancia física. Para el segundo propósito, demostramos cómo se puede entrenar un algoritmo de aprendizaje automático para identificar parejas ligadas gravitacionalmente únicamente a partir de propiedades observables de las galaxias implicadas.

La última parte de la tesis explora la luz intracúmulo de los cúmulos de THE THREE HUNDRED, una componente difusa procedente de estrellas del cúmulo que no pertenecen a ninguna galaxia individual. Dada la mejora en los recursos procedentes tanto de observaciones de bajo brillo superficial como de simulaciones, se trata de un tema de actualidad en el campo de los cúmulos de galaxias. En nuestro trabajo mostramos que, aunque existe una dispersión notable entre los cúmulos, esta componente nunca es despreciable y contiene información sobre la historia evolutiva del cúmulo. También investigamos la relación entre la luz intracúmulo y la componente de materia oscura de los cúmulos, mediante el cálculo y la comparación de sus perfiles de densidad y de dispersión de velocidades. De esta forma, contribuimos a determinar cómo las observaciones de la componente difusa pueden desvelar información sobre la distribución de masa total subyacente en los cúmulos. A lo largo de esta tesis, hemos desarrollado nuevos métodos para identificar, en las simulaciones, los distintos componentes objeto de estudio: las fusiones de cúmulos, la galaxia más brillante del cúmulo, la luz intracúmulo y los pares de galaxias satélite. Además de obtener una comprensión más profunda de los procesos físicos que los dominan, caracterizamos sus propiedades y utilizamos sus propiedades observables para proporcionar nuevas herramientas útiles para analizar las observaciones. Nuestro trabajo ha inspirado otros estudios que se describen en el último capítulo. También ilustramos en este capítulo cómo las tres partes del trabajo están interconectadas y se afectan mutuamente, destacando así la importancia de adoptar distintos enfoques para el estudio de los cúmulos de galaxias.



Para uno de los cúmulos de las simulaciones de THE THREE HUNDRED, seleccionado como ejemplo, proyección en 2D de sus estrellas. De izquierda a derecha se muestran: todas las estrellas en el cúmulo, solo las que pertenecen a la luz intracúmulo (no ligadas a ninguna galaxia) y solo las de la galaxia central.

Machine Learning aplicado a datos de archivos astronómicos

Autor: Pablo García Martín

Tesis doctoral dirigida por: Bruno Merín

Centro: Universidad Autónoma de Madrid

Fecha de lectura: 28 de junio de 2024

En este proyecto examinamos todo el archivo del Telescopio Espacial Hubble buscando objetos del Sistema Solar en sus imágenes. Analizamos aproximadamente 40 000 imágenes de los instrumentos ACS/WFC y WFC3/UVIS. Para llevar a cabo esta tarea, utilizamos un algoritmo de *machine learning* basado en la nube combinado con un proyecto de ciencia ciudadana online, lo que nos permitió obtener un conjunto de entrenamiento para nuestra herramienta de *machine learning*.

Encontramos un total de 1701 objetos: 670 de ellos ya identificados en la base de datos del *Minor Planet Center* y 1031 objetos nuevos y potencialmente desconocidos. Estos potencialmente nuevos objetos varían de 15 a 25 en magnitud aparente (H).

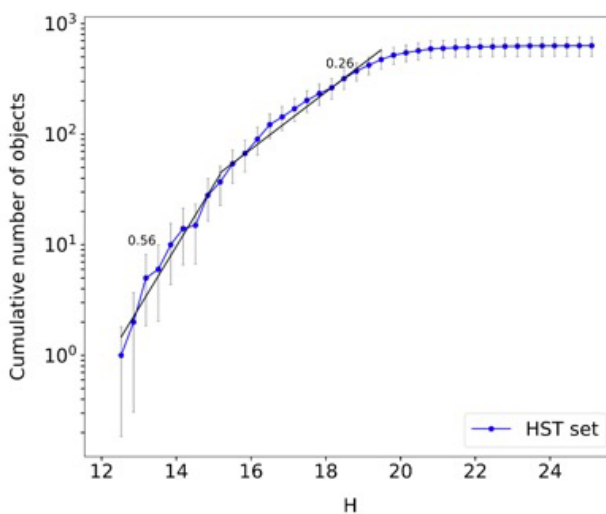
Este conjunto de datos se puede utilizar como un modelo de la población de asteroides teniendo en cuenta que cubre un largo período de tiempo (2002-2021) y que las imágenes tienen una distribución estadísticamente aleatoria en el cielo. Para obtener la distancia de un asteroide utilizando solo una imagen del archivo, usamos un método basado en la curvatura generada en las trazas de asteroides por el paralaje creado por el movimiento de Hubble al tomar la imagen. La precisión de este método se probó utilizando el conjunto de objetos conocidos. Usando la distancia podemos obtener la magnitud absoluta y presentar un modelo de distribución del tamaño de los asteroides.

La mayoría de los objetos que recuperamos son asteroides pequeños del cinturón principal (<1 km). Nuestra distribución de población acumulada (imagen) confirma el cambio de pendiente previamente publicado por otros trabajos, pasando a un valor más bajo a partir de magnitud absoluta 15 (H) y mantenido hasta magnitudes absolutas 19-20 (H), donde nuestro estudio alcanza su límite de detección. También encontramos 45 potenciales cometas y 74 candidatos a *Near Earth Object* (NEO).

Como proyecto anexo relacionado con la preservación del cielo, usamos nuestra herramienta de *machine learning* (y un algoritmo complementario adicional) para identificar trazas de satélites que contaminan las imágenes de Hubble en los archivos de los dos instrumentos considerados. Utilizamos este conjunto de datos para estudiar su crecimiento y el potencial impacto en las imágenes de Hubble de las constelaciones de satélites actuales y futuras en órbita baja terrestre. Encontramos una fracción promedio de $2,7 \pm 0,2\%$ de las imágenes individuales de HST entre 2002-2021 que contienen al menos una traza de satélite, con un crecimiento de $2,8 \pm 0,2\%$ en 2002-2005 a $4,3 \pm 0,4\%$ en 2018-2021 para ACS/WFC, y de $1,2 \pm 0,1\%$ en 2009-2012 a $2,0 \pm 0,2\%$ en 2018-2021 para WFC3/UVIS. Teniendo en cuenta las previsiones de futuros lanzamientos de constelaciones de satélites, nuestras estimaciones indican una probabilidad del 20-50% de que una imagen del Telescopio Espacial Hubble contenga una traza de satélite durante la década de 2030.

Trabajo principal de la Tesis publicado en:
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346771>

Distribución de población acumulada para el total de los asteroides recuperados del archivo de Hubble. Las líneas y cifras en negro representan las pendientes aproximadas.



Estudios de movimientos propios en el disco estelar nuclear

Autor: Álvaro Martínez Arranz

(amartinez@iaa.csic.es)

Tesis doctoral dirigida por: Rainer Schödel

Centro: Universidad de Granada

Fecha de lectura: 23 de julio de 2024

El centro de la Vía Láctea, situado a 8,25 kpc de la Tierra, es una región crucial para la astrofísica debido a su contenido único. En esta área se encuentra el agujero negro supermasivo más cercano, además de cúmulos estelares masivos y grandes concentraciones de gas y polvo. La densidad estelar en el centro galáctico es miles de veces mayor que en el disco galáctico, y aunque solo ocupa el 0,1% de la superficie total de la galaxia, emite el 10% del flujo de Lyman continuo. Sin embargo, la tasa de formación estelar es un orden de magnitud menor de lo esperado dada la alta densidad de gas presente en la región.

Dentro del centro galáctico se localiza la Zona Molecular Central (ZMC), que contiene el 5% de la reserva de gas de la galaxia en menos del 1% de su volumen. A pesar de su gran cantidad de gas, la formación estelar en esta zona es sorprendentemente baja, lo que desafía las expectativas basadas en la densidad de gas. Otra estructura clave es el Disco Estelar Nuclear (DSN), que tiene un diámetro de 150 pc y ha tenido una alta tasa de formación estelar en los últimos 30 millones de años. Sin embargo, solo se han identificado tres cúmulos estelares en esta región, representando menos del 10% de la masa estelar esperada, lo que plantea la cuestión de dónde están los cúmulos faltantes.

El estudio de los cúmulos estelares en el centro galáctico ofrece una oportunidad única para investigar la formación estelar en entornos extremos. Por ejemplo, los cúmulos Arches y Quintuplet presentan una función de masa inicial que parece favorecer la formación de estrellas masivas, una diferencia significativa respecto a los cúmulos en el disco galáctico. Determinar si esta discrepancia es común en otros cúmulos jóvenes podría proporcionar información clave sobre los mecanismos de formación estelar en la región.

La ZMC, que contiene nubes moleculares densas, algunas con masas tan grandes como $10^5 M_{\odot}$, presenta otro enigma: la formación estelar en estas nubes es escasa, desafiando las relaciones establecidas entre las propiedades del gas y la formación estelar. Además, estas nubes no están distribuidas uniformemente, mostrando una asimetría hacia las longitudes galácticas positivas. Aunque las simulaciones sugieren que estas asimetrías pueden ocurrir naturalmente, aún se desconoce el mecanismo físico responsable. Comprender la distribución de estas nubes es crucial para avanzar en el estudio de la dinámica del centro galáctico.

El objetivo de esta disertación es destacar la importancia del análisis de los movimientos propios en el centro galáctico, ya que estos datos permiten restringir distancias e identificar nuevas estructuras. En particular, se presenta un nuevo catálogo de movimientos propios en el centro de la galaxia, derivado

del estudio GALACTICNUCLEUS, que ofrece una cobertura detallada del DSN con una precisión sin precedentes. Los resultados principales se han publicado en tres artículos revisados por pares en *Astronomy & Astrophysics* y se resumen a continuación.

Uno de los principales hallazgos ha sido la restricción de la distancia a la nube molecular G0.253+0.016, también conocida como el Ladrillo. Recientes estudios situaban esta nube a unos 2 kpc más cerca de la Tierra de lo que se pensaba, lo que implicaba que estaba fuera del centro galáctico. Sin embargo, utilizando imágenes de alta resolución obtenidas con el HAWK-I en el *Very Large Telescope* (VLT), se ha demostrado que el Ladrillo se encuentra efectivamente dentro del DSN y, por tanto, en el centro galáctico. Además, este análisis ha revelado la rotación del DSN, corroborando resultados previos. Estos hallazgos muestran cómo el análisis de movimientos propios es una herramienta válida para estimar distancias y detectar estructuras en este entorno complejo.

A pesar de la alta actividad de formación estelar en el centro galáctico en los últimos treinta millones de años, solo se han identificado dos cúmulos jóvenes masivos: Arches y Quintuplet. Su masa combinada representa menos del 10% de lo que debería haber, lo que ha dado lugar al "problema de los cúmulos faltantes". Esto puede explicarse en parte por la extrema aglomeración de estrellas en la región, que dificulta la identificación de cúmulos mediante inspección visual. Además, los cúmulos más masivos se disuelven rápidamente debido a las duras condiciones del centro galáctico.

Para abordar este problema, se ha utilizado un algoritmo de aprendizaje automático no supervisado (DBSCAN) para analizar catálogos de movimientos propios y fotometría en busca de grupos de estrellas con movimientos comunes que podrían indicar la presencia de cúmulos estelares. Este análisis ha identificado tres grupos de estrellas con movimientos comunes y empaquetamiento espacial denso, lo que los convierte en sólidos candidatos para ser cúmulos estelares.

En un análisis posterior, se ha confirmado espectroscópicamente que uno de estos grupos es un cúmulo joven en el centro galáctico, que ha sido nombrado Candela 1. Este hallazgo es significativo, ya que hasta ahora se habían identificado muy pocos cúmulos jóvenes en esta región.

La metodología utilizada ha demostrado ser eficaz en la búsqueda de cúmulos estelares jóvenes en el centro galáctico. En un área relativamente pequeña se han encontrado tres posibles cúmulos, y uno ha sido confirmado. Con el desarrollo de un nuevo catálogo de movimientos propios, que cubrirá un área más amplia del centro galáctico, se espera identificar más cúmulos jóvenes y continuar investigando la función de masa inicial en esta región, para comprender si difiere fundamentalmente de la del disco galáctico.

Tesis disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/366986>

Mejorando las simulaciones cosmológicas: modelos semianalíticos, estructura interna de los halos y técnicas de aprendizaje automático

Autor: Daniel López-Cano

(daniellopezcano13@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Raúl E. Angulo

Centro: Donostia International Physics Center (DIPC) y U. Autónoma de Madrid (UAM)

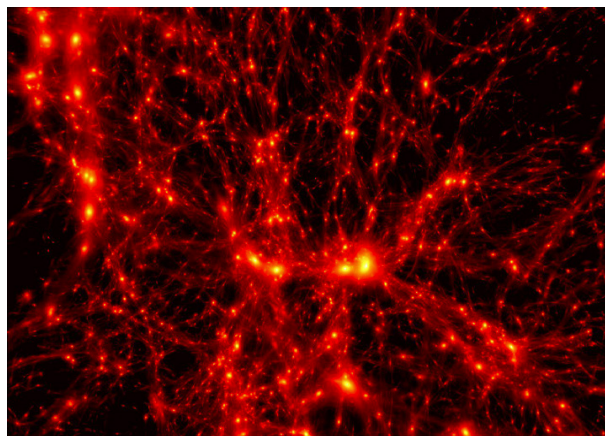
Fecha de lectura: 6 de septiembre de 2024

En el campo de la cosmología moderna, las simulaciones cosmológicas se han consolidado como herramientas esenciales para comprender la formación y evolución de estructuras en el Universo a gran escala. Estas simulaciones permiten estudiar el comportamiento de múltiples partículas bajo la influencia de la gravedad, conectando las predicciones teóricas con las observaciones realizadas por telescopios que detectan las posiciones y propiedades de millones de galaxias. Sin embargo, la creciente complejidad de las observaciones actuales realizadas por nuevas y ambiciosas campañas de observación ha puesto de manifiesto la necesidad de mejorar tanto la precisión como la eficiencia de estas simulaciones. Mi investigación doctoral se desarrolla en este contexto y tiene como objetivo el mejorar distintos aspectos de las técnicas actuales para acercar más las simulaciones cosmológicas al Universo que observamos.

En la primera parte de mi trabajo, empleo un modelo semianalítico para poblar simulaciones de materia oscura con galaxias con el fin de reproducir la población de galaxias que se espera observar con la misión *Euclid* (telescopio desarrollado por la ESA, en activo desde verano de 2023). El modelo semianalítico SAGE se emplea junto con otros códigos sobre las simulaciones de materia oscura UNITSIM para generar catálogos de galaxias que incluyen predicciones para la intensidad de sus líneas de emisión (en particular $H\alpha$). Estos catálogos de galaxias pueden utilizarse para predecir la población de galaxias que la misión *Euclid* será capaz de detectar. Nuestros catálogos sintéticos de galaxias permiten estudiar cómo se distribuyen las galaxias en el espacio y cómo evolucionan sus propiedades a lo largo del tiempo.

En la segunda parte de la tesis, presento un modelo que permite predecir con gran precisión la estructura interna de los halos de materia oscura, estructuras gravitacionalmente ligadas que generan los pozos de potencial dentro de los cuales se forman las galaxias. Este modelo tiene en cuenta cómo la estructura interna de los halos depende de su instante de formación, una variable que a su vez depende de propiedades como la masa final del halo estudiado, el tiempo cósmico en el que se observa, y la cosmología asumida. Esta contribución es fundamental para entender la distribución de materia a pequeñas escalas y mejorar la correspondencia entre halos y galaxias en las simulaciones.

La tercera parte de la tesis explora el uso de técnicas de aprendizaje automático para predecir qué regiones de las condiciones iniciales de una simulación terminarán formando halos de materia oscura. Este enfoque emplea redes neuronales para modelar



Proyección de la densidad de materia oscura mostrando las estructuras que se han formado en una simulación cosmológica debido al efecto de la gravedad.

procesos complejos de formación de halos, permitiendo realizar predicciones rápidas y analizar cuáles son los aspectos de las condiciones iniciales que desempeñan un papel clave en la formación de estas estructuras. Las técnicas de aprendizaje automático, tal como se presentan en esta tesis, ofrecen una perspectiva innovadora que complementa los métodos tradicionales para estudiar la formación de estructuras en el Universo.

En conjunto, los trabajos presentados en esta tesis amplían nuestra comprensión sobre la formación de estructuras en el Universo y cómo modelarlas con mayor precisión dentro del marco de las simulaciones cosmológicas. Además, muestran cómo el uso de técnicas innovadoras, como el aprendizaje automático, puede integrarse eficazmente con los métodos tradicionales para ofrecer nuevas perspectivas en el estudio de la formación y evolución de halos de materia oscura. Estos avances son de suma importancia en el contexto actual, dado que las simulaciones cosmológicas son la principal herramienta para interpretar los datos obtenidos por las nuevas campañas observacionales que mapean la estructura a gran escala del Universo.

En el futuro, la sinergia entre el aprendizaje automático, la formación y evolución de galaxias, y la teoría de formación de estructuras, permitirá desarrollar nuevas metodologías que integren estas áreas, proporcionando una visión más completa y detallada de la evolución del Universo. Estas técnicas combinadas no solo mejorarán la precisión de las simulaciones actuales, sino que también facilitarán la identificación de patrones y relaciones complejas en los datos observacionales, abriendo nuevas vías para la exploración y la investigación la estructura a gran escala de nuestro Universo.

Cuásares magnificados gravitatoriamente: desde estrellas a cúmulos de galaxias

Autora: Raquel Forés Toribio

Tesis doctoral dirigida por: José Antonio

Muñoz Lozano

Centro: Universitat de València

Fecha de lectura: 10 de septiembre de 2024

El fenómeno lente gravitatoria ocurre cuando un objeto masivo se encuentra entre el observador y una fuente emisora. Tal como describe la Relatividad General, el objeto masivo deforma el espacio-tiempo y curva los rayos de luz procedentes de la fuente. Esta deflexión de la luz puede producir un incremento del brillo y múltiples imágenes de la fuente. Por este motivo, el efecto lente gravitatoria se ha convertido en una gran herramienta para estudiar fuentes distantes, pero también para caracterizar el objeto deflector (o lente), puesto que la deflexión de la luz depende de su distribución de masa. Esta tesis se centra en el escenario donde un cuásar distante es magnificado por una galaxia o un cúmulo de galaxias. Los cuásares se observan como fuentes puntuales, luminosas y variables, y son el resultado de la acreción de material alrededor de un agujero negro supermasivo en el centro de su galaxia anfitriona. Las condiciones físicas y las estructuras formadas a partir de este proceso son todavía objeto de intensa investigación, donde el efecto lente gravitatoria es de gran utilidad.

En esta tesis, presentamos un nuevo modelo de la distribución de masa del sistema lente SDSS J1004+4112 (cuya imagen se muestra en la figura). El deflector es un cúmulo de galaxias, con un desplazamiento al rojo de $z=0,68$, que curva la luz de un cuásar, con un corrimiento al rojo de $z=1,73$, y otros tres grupos de galaxias de fondo. Para restringir el modelo de masa, se utilizan los observables de las cuatro imágenes del cuásar formadas por el efecto lente como son las posiciones de las imágenes, los cocientes de magnificación y los retrasos temporales. Además, se incluyen otros parámetros medidos como la posición de las galaxias del cúmulo, su elipticidad, luminosidad, la dispersión de velocidades de la galaxia más brillante del cúmulo y las posiciones de las imágenes de las otras galaxias de fondo. De este modo se han podido restringir los parámetros del modelo. Es de especial interés la pendiente interna del perfil de masa del halo de materia oscura, la cual es compatible con la del perfil Navarro-Frenk-White. También se ha encontrado una pequeña separación entre la galaxia más brillante del cúmulo y el centro del potencial gravitatorio del halo de materia oscura, así como cierto alineamiento en la dirección de la elipticidad de las dos componentes. A partir del modelo se ha inferido una estimación para el cuarto retraso temporal que todavía carece de determinación observacional y los parámetros de magnificación en las posiciones de las imágenes del cuásar.

Debido a la compacidad del disco de acreción del cuásar, objetos de masa estelar en la lente principal curvan los rayos de luz del orden de microsegundos de arco produciendo cambios en el brillo de la fuente. Esta variabilidad es independiente en cada imagen del cuásar y se superpone a la propia variabilidad intrínseca del cuásar. Puesto que la variabilidad intrínseca es común a todas las imágenes, pero con un tiempo de llegada

al observador diferente, se puede extraer la variación debida al efecto microlente restando pares de curvas de luz de distintas imágenes desplazadas por su retraso temporal. Hemos estudiado este efecto para SDSS J1004+4112 modelando la ocurrencia de efecto microlente en las seis posibles diferencias de las curvas luz observadas durante catorce años y medio. A partir del ajuste de los modelos a las observaciones, hemos inferido el tamaño del disco de acreción del cuásar en la banda fotométrica r y las fracciones de masa estelar del medio intracúmulo en las cuatro posiciones de las imágenes del cuásar. El tamaño del disco es compatible con la mayoría de las determinaciones previas para este sistema. La fracción estelar en la imagen más brillante del cuásar es ligeramente mayor que la esperada y podría indicar la presencia de una componente estelar todavía sin detectar.

Las deflexiones debidas a las microlentes desvían, del orden de microsegundos de arco, el centroide de las imágenes múltiples de cuásares afectados por el efecto lente gravitatoria. En esta tesis proponemos y estudiamos la viabilidad de medir estos desplazamientos con una única observación seleccionando como referencia una componente grande del cuásar que no esté afectada por el efecto microlente. Para ello, se ha realizado un estudio exhaustivo de la dependencia del desplazamiento del centroide con los parámetros involucrados en el efecto microlente (el macromodelo, la fracción de microlentes y el tamaño de la fuente). Gracias a las dependencias obtenidas, estimamos las desviaciones astrométricas de 79 imágenes de cuásares múltiples conocidos. Esto permite seleccionar los candidatos más adecuados para observarlos con la siguiente generación de espectrógrafos de campo integral como HARMONI en el ELT que tendrá la precisión astrométrica suficiente como para detectar estos desplazamientos y así generar una nueva metodología para estudiar la estructura no resuelta de los cuásares y la abundancia de microlentes en los sistema lente.

Tesis disponible en: <https://roderic.uv.es/items/1daa9156-4e33-4ee2-aa93-a241a051c3a2>

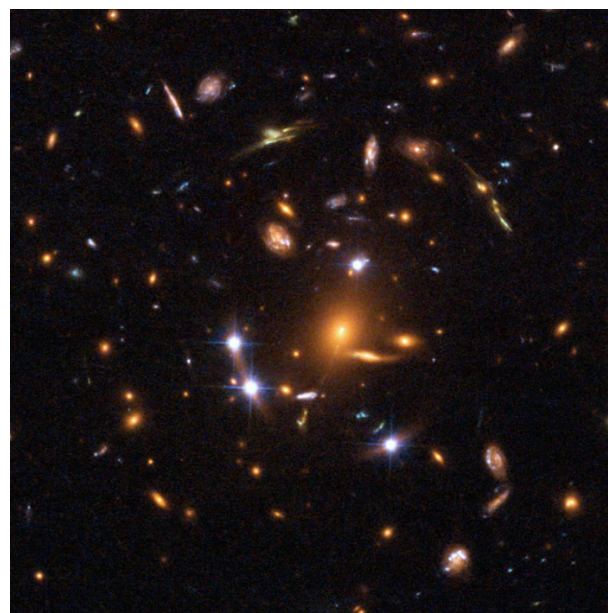


Imagen del sistema lente SDSS J1004+4112 tomada por el Telescopio Espacial Hubble (GO-9744, IP: C. Kochanek). La galaxia más brillante del cúmulo se muestra en el centro y las cuatro imágenes del cuásar se observan como puntos brillantes blancos. También se aprecian galaxias de fondo magnificadas en forma de arcos.

Estudio bidimensional del mecanismo de ionización del gas difuso en galaxias del Universo local con MUSE

Autor: Raúl González Díaz
(raulghuelma@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Fernando Fabián Rosales Ortega y Lluís Galbany González

Centro: Inst. Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica y U. Autónoma de Barcelona

Fecha de lectura: 10 de septiembre de 2024

En este trabajo, presentamos el proyecto *Bidimensional Exploration of the warm-Temperature Ionised gas* (BETIS), enfocado en el estudio del gas ionizado difuso (DIG) en galaxias espirales cercanas utilizando el espectrógrafo de campo integral MUSE. El objetivo principal es comprender los diversos mecanismos de ionización que dan lugar al DIG. Esto implica un análisis espacialmente resuelto de especies de alta y baja ionización en espectros ópticos. Hemos introducido un nuevo método para definir espectroscópicamente el DIG, adaptable a diferentes resoluciones de galaxias.

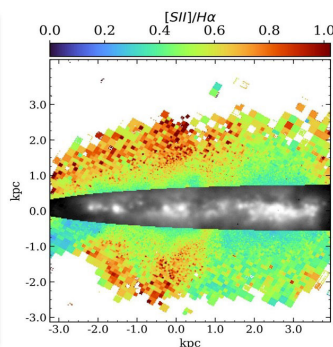
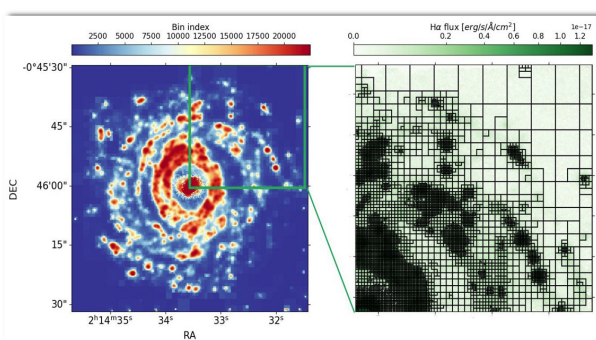
Inicialmente, hemos utilizado una técnica de *binning* adaptativo basada en la relación señal-a-ruido (S/N) de la línea [SII] para mejorar la S/N de otras líneas. Posteriormente creamos una máscara para eliminar regiones HII brillantes y débiles. También hemos evaluado la idoneidad de usar el ancho equivalente de H α (EWH α) para definir el DIG y su régimen de ionización. Hemos encontrado que para EWH α < 3 Å, esperado para estrellas evolucionadas de baja masa y alta temperatura (HOLMES), el valor depende de la técnica de síntesis de poblaciones utilizada. El análisis de la muestra revela una fracción de DIG consistente del 40%-70% en todas las galaxias. Las tendencias de los cocientes [NII]/H α , [SII]/H α , [OI]/H α y [OIII]/H β indican una correlación entre la ionización en el DIG y las regiones HII vinculada al brillo superficial de H α (SBH α).

Los diagramas de diagnóstico muestran que el DIG generalmente cae dentro de los cocientes de línea correspondientes

a la fotoionización debida a la formación estelar (FE), con un desplazamiento que sugiere ionización debido a choques rápidos. Sin embargo, el análisis individual de las galaxias indica que dicho desplazamiento es atribuido a galaxias *Seyfert* en la muestra. Esto sugiere que las galaxias con núcleo activo deben ser analizadas por separado, ya que su emisión es indistinguible del DIG de alta excitación.

En un segundo estudio dentro del proyecto BETIS, el enfoque está en el gas ionizado difuso extraplano (eDIG), una componente clave para entender los procesos de retroalimentación entre los discos y halos galácticos. Hemos aplicado la metodología de *binning* del primer estudio de BETIS a una muestra de ocho galaxias observadas con MUSE. Los cocientes [NII]/H α , [SII]/H α , [OI]/H α y [OIII]/H β muestran una estructura de ionización compleja en los halos galácticos, influenciada por la distribución espacial de las regiones HII. Hemos identificado el escape de fotones del continuo de Lyman de las asociaciones OB como la principal fuente de ionización, con la temperatura electrónica y el cociente de ionización S $^+$ /S dependiendo de la distribución de las regiones HII dentro de los discos galácticos. El análisis excluye a los HOLMES como fuentes significativas de ionización para explicar los inusuales cocientes de línea a mayores distancias del plano medio galáctico. En cambio, hemos identificado los choques de los mecanismos de retroalimentación relacionados con la FE como fuentes de ionización secundarias prometedoras para el eDIG. Presentamos un conjunto de modelos que integran mecanismos de ionización que surgen de choques rápidos y fotoionización asociada con la formación de estrellas. Los modelos que incorporan ionización por choques rápidos y fotoionización por FE sugieren que la contribución de choques rápidos a la ionización del eDIG varía del 20% al 50% en la muestra, con variaciones locales de hasta el 20% dentro de los halos individuales de las galaxias. Esto se correlaciona con la presencia de filamentos y componentes estructurales en los halos galácticos. Las altas densidades, dadas por una disminución del cociente del doblete de [SII], y los altos cocientes de [OI]/H α (ambos correlacionados con la distancia al plano medio, y característicos del gas ionizado comprimido por choques), respaldan la presencia de choques, ya que es característico del gas ionizado comprimido por choques y probablemente provenientes de la retroalimentación en regiones de intensa FE dentro del disco galáctico. Estos resultados son consistentes en todas las galaxias analizadas en esta muestra.

Tesis disponible en: https://drive.google.com/file/d/11H_cpvdUVRsKp2O6288DS4k4KPBvloq/view?usp=drive_link



La primera figura es el mapa de segmentación obtenido de nuestro algoritmo de binning para NGC863, cuyos índices van de 1 al número de bins. El panel central es un zoom del mapa de segmentación donde se trazan los bordes de los bins sobre el mapa H α de la galaxia. Es notable que las regiones HII, cuya S/N es mayor, no están bineadas, manteniendo la estructura píxel a píxel, y los bins se hacen más grandes a medida que nos alejamos de las regiones HII. A la derecha se muestra el mapa del cociente [SII]/H α para la galaxia ESO157-49, con el plano galáctico enmascarado en H α . El mapa muestra la compleja estructura del eDIG en el halo de la galaxia, cuyo cociente depende notablemente de la distribución de regiones HII en el plano.

Desentrañando la complejidad de los flujos cósmicos: gradientes fuertes, ondas de choque y turbulencia

Autor: David Vallés Pérez

(david.valles-perez@uv.es)

Tesis doctoral dirigida por: Susana Planelles

Mira y Vicent Quilis Quilis

Centro: Universitat de València

Fecha de lectura: 26 de septiembre de 2024

La formación y evolución de las estructuras cósmicas procede a través del colapso gravitacional de fluctuaciones de densidad primordiales, en un proceso no lineal que da lugar a la aparición de la telaraña cósmica y una rica jerarquía de estructuras (White & Rees, 1978). Además de la gravedad, dominada por la materia oscura, muchos otros fenómenos asociados con la física de los bariones intervienen en esta evolución, moldeando las propiedades físicas y observacionales de las galaxias, cúmulos de galaxias y los entornos que habitan (Vogelsberger, 2020). Los procesos de formación de estructuras cosmológicas son complejos, en el sentido de ser altamente no lineales, e involucran una amplia gama de escalas físicas, lo que hace que las simulaciones numéricas sean una herramienta indispensable para su comprensión (p. ej., Kravtsov & Borgani, 2012).

Los objetivos científicos de esta tesis doctoral se han orientado principalmente hacia el estudio numérico de la formación de cúmulos de galaxias, en primer lugar, y de vacíos cósmicos, en segundo lugar, como dos extremos complementarios del amplio rango de estructuras cósmicas. En los cúmulos de galaxias, la agitación del gas debido a acreción desde regiones menos densas y fusiones de cúmulos, junto con otros procesos, genera dos importantes fenómenos de física fundamental en fluidos astrofísicos que no han sido plenamente descritos hasta ahora en este contexto: ondas de choque y turbulencia. Estos fenómenos tienen un impacto decisivo en las propiedades dinámicas y termodinámicas del medio intracumular (ICM; Vazza et al. 2009) y serán objeto de observatorios punteros y futuros (p. ej., XRISM o *Athena* en rayos X, Zhang et al. 2024; o SKA, en radio, Ascaso et al. 2015). En cuanto a los vacíos cósmicos, aunque gran parte de su interés proviene de su papel como entornos prístinos para la evolución de las galaxias debido a su campo de velocidades predominantemente saliente, la situación puede ser más compleja en un contexto cosmológico.

Los principales resultados de esta tesis se pueden desgarnar en cuatro líneas, estrechamente relacionadas, que se describen a continuación.

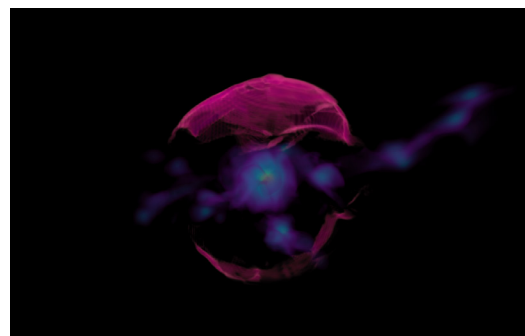
1. El desarrollo de herramientas para posibilitar el análisis de simulaciones (cosmológicas y/o hidrodinámicas) de alta resolución, que implican estructuras de datos altamente no triviales para resolver con un muy amplio rango dinámico las ecuaciones de la evolución de estructuras. Los resultados han incluido tres códigos que se han puesto a disposición de la comunidad, posibilitando el análisis cuantitativo de los campos de velocidad turbulentos y altamente compresivos que surgen durante la evolución cosmológica (vortex y vortex-p) y la identificación de halos de materia oscura, galaxias y sus subestructuras (ASOHF).
2. El estudio acerca de la formación de cúmulos de galaxias. En las regiones más externas de los cúmulos, que serán objeto

de estudio por futuros observatorios en radio (p. ej., SKA) y rayos X (p. ej., ATHENA), el gas y la materia oscura están en proceso de ser acretados y entrar en equilibrio con el potencial gravitatorio del cúmulo. En esta línea, se han estudiado la caracterización de estos procesos de acreción y fusiones de cúmulos y sus efectos sobre el ICM y el *Warm-Hot Intergalactic Medium* (WHIM), para contribuir al modelado teórico que permitirá obtener la máxima información posible de futuras observaciones. En particular, entre otros aspectos se ha hecho especial hincapié en la distribución espacial –altamente anisótropa– de flujos de acreción y en la posibilidad de determinar propiedades evolutivas de los halos de materia oscura a partir de cantidades potencialmente observables.

3. La caracterización de fenómenos hidrodinámicos, como ondas de choque y turbulencia, que son centrales para las propiedades de los bariones en los cúmulos de galaxias. Se ha investigado la generación y distribución de movimientos turbulentos o a pequeña escala del ICM, aportando pistas para interpretar las inminentes observaciones de XRISM y futuros observatorios en rayos X y radio. En cuanto al estudio de los choques de acreción, que delimitan el contenido bariónico de los cúmulos de galaxias, se ha hallado una nueva relación de escala que permitirá, una vez estas características sean observadas y caracterizadas sistemáticamente, determinar la masa total de los cúmulos en grandes aperturas, con precisiones comparables a otros métodos actuales. Estos resultados, que se han publicado en *Nature Astronomy*, podrán ser cruciales para afianzar las medidas de masa de los cúmulos (frecuentemente, discrepantes entre sí) y, por tanto, contribuirán a seguir poniendo a prueba el modelo Λ CDM.
4. El estudio de los vacíos cósmicos en el régimen no lineal, usando simulaciones especialmente diseñadas para describir estas regiones. En esta dirección, se han obtenido por primera vez resultados indicando que el campo de velocidades de estos vacíos es complejo y puede presentar, en una buena fracción de los vacíos, una considerable entrada de materia desde regiones más densas. Estos resultados, recogidos en *The Astrophysical Journal Letters*, disienten de la asunción habitual y podrían incluso explicar resultados observacionales punteros, como la aparente falta de diferencias entre galaxias en vacíos y en entornos densos (Dominguez-Gómez et al. 2022).

Los resultados inmediatos de esta tesis se recogen en un total de ocho publicaciones, que pueden encontrarse incluidas y referenciadas en el documento de la tesis doctoral.

Tesis disponible en: <https://hdl.handle.net/10550/101072>



Renderización tridimensional mostrando la densidad de materia bariónica alrededor de un cúmulo de galaxias de $3 \times 10^{14} M_{\odot}$, extraído de una simulación cosmológica. Más allá de una forma aproximadamente esférica, permeada por un par de filamentos cósmicos que alimentan al cúmulo y varias subestructuras, el choque externo de acreción de este cúmulo está representado en color magenta.

Con esta azulada puesta de sol en Marte, tomada por el rover Perseverance desde el cráter Jezero, despedimos 2024 deseándoles lo mejor para el próximo año.
Créditos: NASA/JPL-Caltech.



**Sociedad Española
de Astronomía**

Universidad de Barcelona,
Facultad de Física
Av. Martí Franquès, 1
Barcelona 08028

Tfno: +34 91 394 5249
Fax: +34 91 394 5051