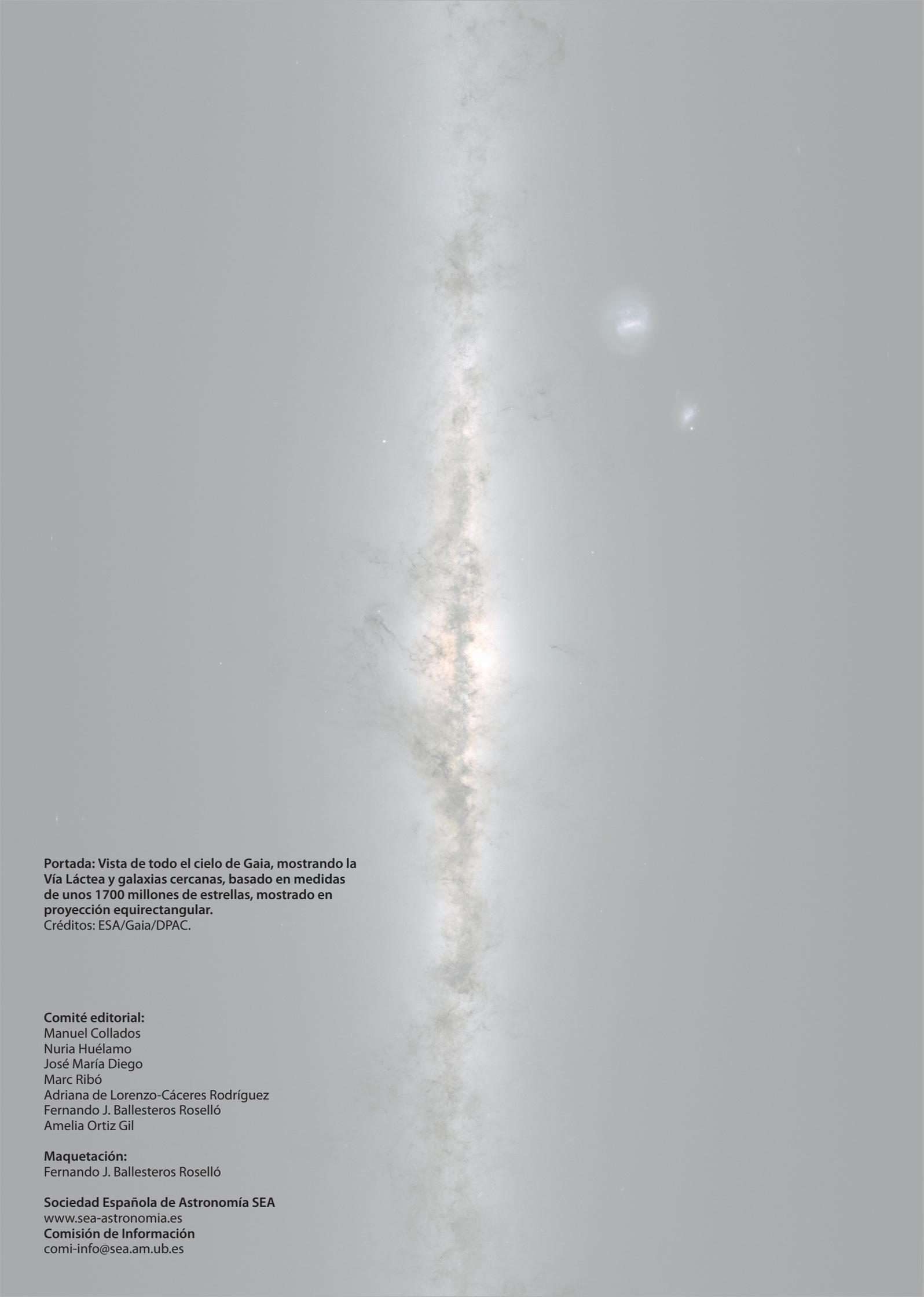




# SEA

Sociedad Española de Astronomía



**Portada: Vista de todo el cielo de Gaia, mostrando la Vía Láctea y galaxias cercanas, basado en medidas de unos 1700 millones de estrellas, mostrado en proyección equirectangular.**  
Créditos: ESA/Gaia/DPAC.

**Comité editorial:**

Manuel Collados  
Nuria Huélamo  
José María Diego  
Marc Ribó  
Adriana de Lorenzo-Cáceres Rodríguez  
Fernando J. Ballesteros Roselló  
Amelia Ortiz Gil

**Maquetación:**

Fernando J. Ballesteros Roselló

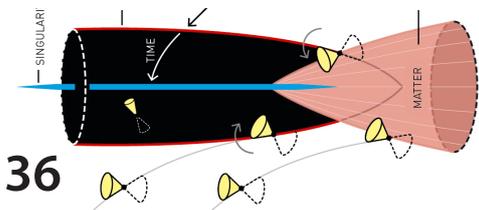
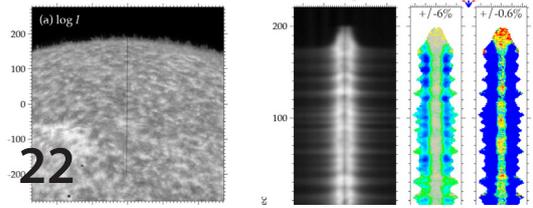
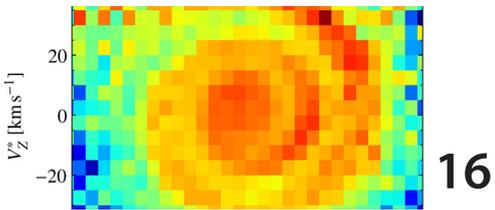
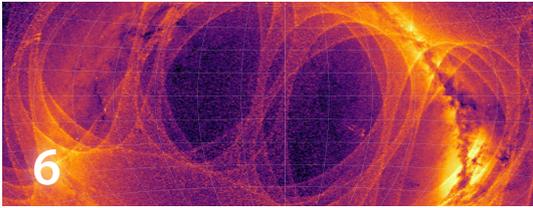
**Sociedad Española de Astronomía SEA**

[www.sea-astronomia.es](http://www.sea-astronomia.es)

**Comisión de Información**

[comi-info@sea.am.ub.es](mailto:comi-info@sea.am.ub.es)

# CONTENIDOS



- 5 Editorial
- 6 Gaia EDR3 / Avanzando a pasos de gigante
- 16 Gaia: una escalera (de caracol) hacia el conocimiento
- 22 Espectropolarimetría ultravioleta
- 32 La primera experiencia virtual de la SEA
- 36 Nuevo Nobel para la astrofísica
- 42 Ecos de (la) Sociedad
- 43 Libros
- 44 Tesis doctorales



# EDITORIAL

Aquí tenemos de nuevo nuestro Boletín, que acompaña en este caso al solsticio de invierno de este horrible año 2020. Todas las actividades de estos últimos meses se han visto directamente influidas por esta pandemia que estamos sufriendo, lo que se ha visto reflejado en la anulación de congresos, en clases en la universidad en régimen telemático o semipresencial o en multitud de reuniones que han usado herramientas informáticas para mantener la necesaria comunicación entre todos los grupos.

Un ejemplo de ello fue nuestra XIV Reunión Científica, que estaba prevista originalmente en La Laguna y que se tuvo que realizar de manera virtual (pasando a ser la reunión XIV.0). A pesar de la falta de experiencia en organizar eventos de esta clase en formato telemático, la reunión fue todo un éxito, con 757 participantes inscritos. En este Boletín, Benjamín Montesinos nos cuenta los detalles de cómo se gestó su organización y algunos aspectos de su desarrollo.

Coincidiendo con la publicación de la tercera remesa de datos de Gaia (el denominado EDR3), Javier Castañeda y sus colaboradores nos explican los avances conseguidos con este nuevo catálogo, con el que se logra mejorar la precisión astrométrica y fotométrica respecto a los datos publicados con anterioridad. Así, la precisión en paralaje ha aumentado en un 30 por ciento y se ha aumentado en un factor dos la precisión en los movimientos propios.

Basándose en los excelentes datos de Gaia, Teresa Antoja y Pau Ramos nos describen sus hallazgos obtenidos sobre el disco de la Galaxia, algunos de los cuales han sido publicados en la prestigiosa revista Nature.

Javier Trujillo Bueno nos introduce el tema de la espectropolarimetría ultravioleta y algunos de los resultados obtenidos con los cohetes CLASP-1 y CLASP-2 que observaron el sol durante sus vuelos realizados, respectivamente, en 2015 y 2019. Con estos experimentos, se ha abierto una ventana para estudiar el campo magnético y la geometría del plasma en las capas más externas de la cromosfera solar, muy cerca de la base de la corona.

Este año 2020 hemos visto cómo el premio Nobel de Física ha sido otorgado a Reinhard Genzel, Andrea Ghez y Roger Penrose por sus avances en nuestra comprensión de los agujeros negros. Rafael Bachiller nos los introduce en un artículo muy ameno e interesante.

Como es habitual, el Boletín se complementa con nuestros Ecos en los que Amelia Ortiz nos cuenta noticias de interés, con las reseñas de tesis doctorales que ha recopilado Adriana de Lorenzo y con el libro "Fotografiar lo invisible" que nos presenta Fernando Ballesteros.

El Comité Editorial del Boletín y la Junta Directiva os desea profundamente que tengáis unas Navidades lo más normales posibles, con el mejor estado de salud y en cercanía de vuestras familias. Ojalá el nuevo año 2021 nos permita recuperar las actividades habituales.

Manuel Collados  
*Instituto de Astrofísica de Canarias*  
*Universidad de La Laguna*

En este solsticio de invierno de 2020 se cumplirán 2341 días de plena operación científica de la misión Gaia de la Agencia Europea del Espacio (ESA). La comunidad europea responsable del tratamiento y procesado de los datos, formada por más de 450 científicos e ingenieros, hizo posible en 2016 y 2018 dos publicaciones de datos (DR1, DR2) que sabemos han revolucionado los campos de investigación en física del sistema solar, estelar y galáctica. Avanzando a pasos de gigante, el pasado 3 de diciembre de 2020, se ha hecho pública y abierta a toda la comunidad la primera entrega del tercer catálogo de datos de Gaia, al que llamamos Gaia EDR3, con datos astrométricos y fotométricos nuevos y más precisos para 1.8 mil millones de fuentes más brillantes que la magnitud 21. En este artículo desvelamos el potencial de esta nueva entrega, con datos de los primeros 34 meses de misión, así como los primeros resultados científicos alcanzados durante su fase de validación. Esta es, sin duda, la punta de un iceberg, en estos momentos se está trabajando en el procesado de los 66 meses de datos ya adquiridos, y vislumbramos una extensión de la misión hasta el año 2025.

Javier Castañeda  
Claus Fabricius  
Francesca Figueras  
Carme Jordi  
Xavier Luri  
Roger Mor  
Ferran Torra

Institut de Ciències del Cosmos (IEEC-UB)

Luis M. Sarro  
Dpto. de Inteligencia Artificial, UNED

## QUE NOS OFRECE EDR3, NOVEDADES E HITOS ALCANZADOS

EDR3 supone un nuevo avance en términos de precisión astrométrica y fotométrica, también en exactitud y homogeneidad. Respecto a DR2, la precisión en paralaje ha aumentado en un 30 por ciento, y se ha alcanzado un aumento en un factor dos en la precisión en los movimientos propios. También se han reducido significativamente los errores sistemáticos, y todo ello gracias a un modelado mucho más sofisticado y complejo del instrumento astrométrico y otras importantes mejoras en la cadena de procesado de los datos. La fotometría, con importantes mejoras en el preprocesado, en la estimación del fondo de cielo y en la calibración, presenta sistemáticos por debajo del 1% en magnitud en todas las bandas, siendo relevante su mayor homogeneidad en color, magnitud y posición.

Gaia EDR3 representa también la tercera materialización del sistema de referencia en el óptico (Gaia-CRF3). Este sistema está basado únicamente en fuentes extragalácticas, y para su definición se han usado los datos de 1.6 millones de cuásares (Klioner et al. 2020). Se ha conseguido alinear este sistema Gaia-CRF3 al sistema de referencia internacional ICRF con una precisión de 10 microsegundos de arco ( $\mu\text{as}$ ) para la época J2016.0, con una rotación inferior a los 10  $\mu\text{as/año}$ . Un sistema de referencia en el óptico de alta precisión con un rango de magnitud de 6 a 21 era una de las grandes promesas de Gaia hoy hecha realidad.

La construcción de la lista de fuentes en Gaia EDR3 (y Gaia DR3) ha aportado mejoras notables en varios aspectos gracias a la optimización de los algoritmos. Esta herramienta de la cadena de procesado es liderada por el equipo de ingeniería de Barcelona y ejecutada en el supercomputador Marenostrum del Barcelona Supercomputing Center (BSC). Entre las mejoras, destacan el tratamiento de las estrellas de alto movimiento propio y la minimización de la perturbación causada por las detecciones espurias (Torra et al, 2020). Dichas detecciones son causadas en su mayor parte por los picos de difracción de estrellas brillantes (Figura 1), por rayos cósmicos muy energéticos, o por los principales planetas del sistema solar en tránsito a través o cerca del campo de visión del instrumento. La Figura 2 muestra una comparación entre los mapas de densidad de las detecciones espurias

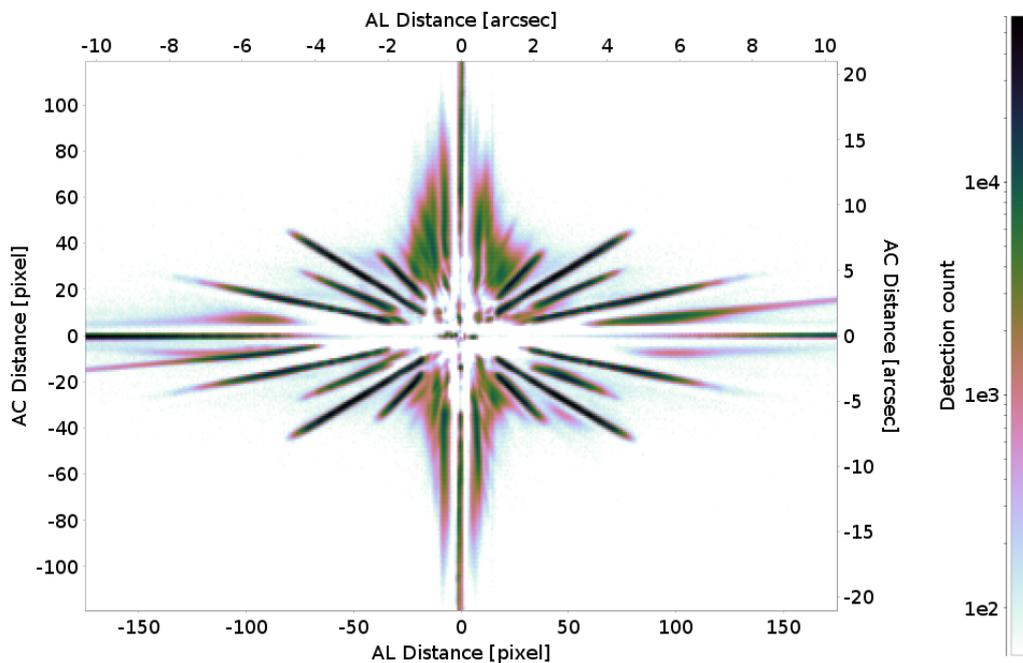
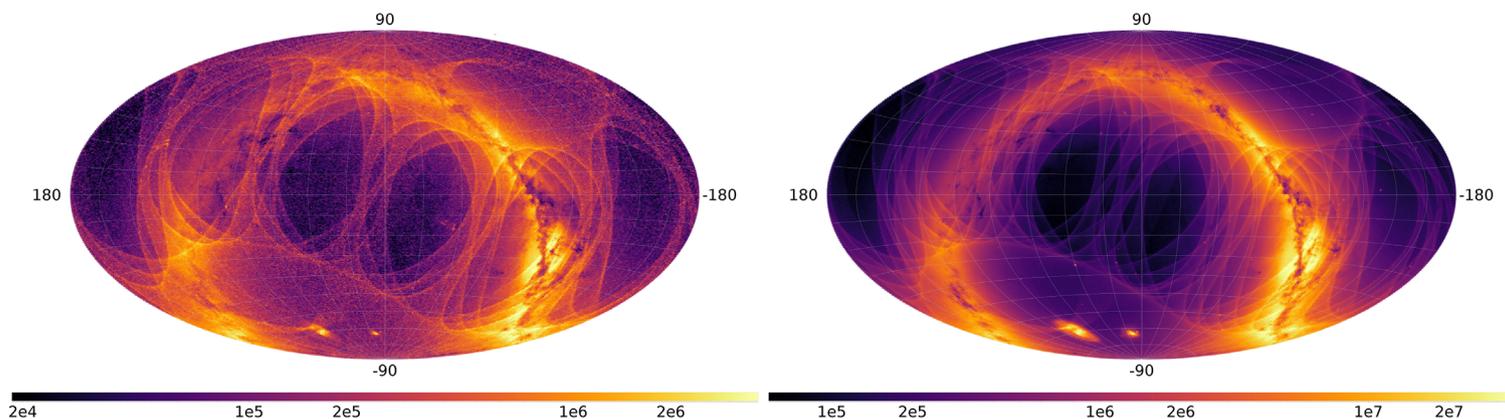


Figura 1: Mapa de densidad obtenido mediante la superposición de las detecciones a bordo de 475 objetos en el rango de magnitud G entre 7 y 7.5 (33 meses de misión). Se observa con claridad la figura de difracción del instrumento, responsable de la mayoría de detecciones espurias (falsas) que deben identificarse y eliminarse en el proceso de asignación de las observaciones a fuentes reales. (Crédito: Gaia Collaboration, F. Torra, et al. A&A 2020).

Figura 2: Mapas del cielo, en coordenadas ecuatoriales, mostrando las detecciones clasificadas como espurias (izquierda) y las detecciones asignadas a fuentes del catálogo (derecha). En la imagen de la izquierda se aprecia claramente la ley de escaneo de Gaia, mientras que en la de la derecha destacan el plano galáctico y las nubes de Magallanes (Crédito: F. Torra).



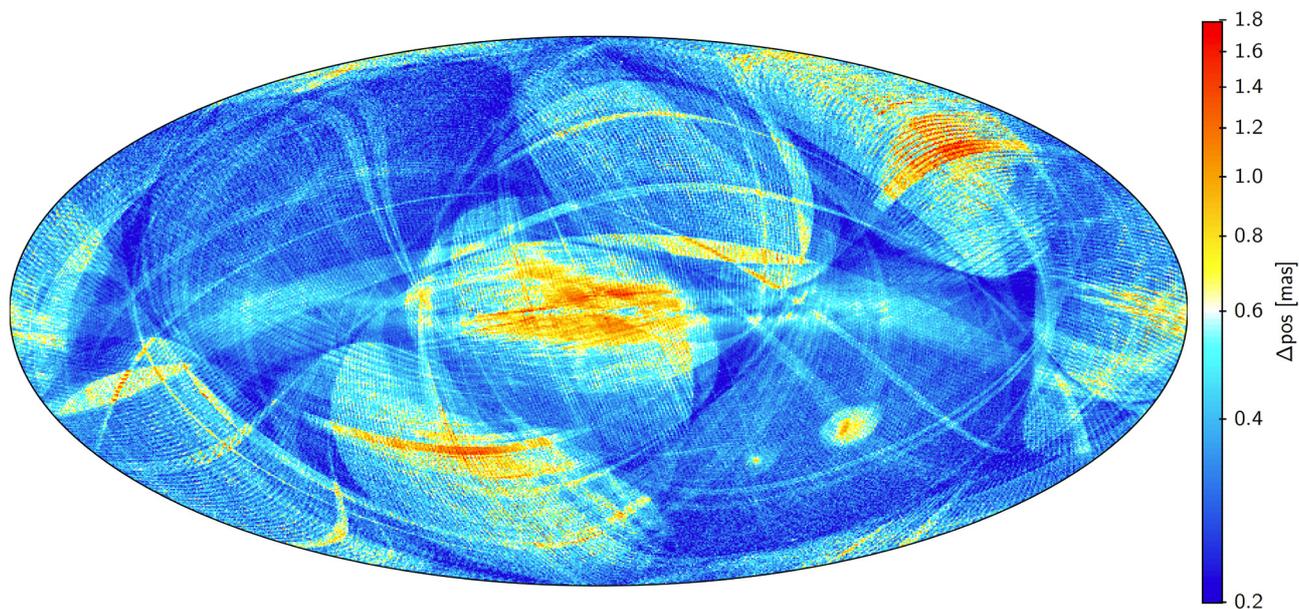


Figura 3: Mapa en coordenadas galácticas de las diferencias entre las posiciones medias de Gaia EDR3 respecto a Gaia DR2. (Crédito: Gaia Collaboration, C. Fabricius, et al. A&A 2020).

(donde domina la ley de escaneo de Gaia) y la de las detecciones asignadas a fuentes. Las mejoras de estos algoritmos han ayudado a reducir significativamente el número de fuentes con paralajes negativos. El tratamiento de fuentes extremadamente juntas también ha mejorado; el límite de resolución para que dos detecciones sean asignadas a dos fuentes distintas se ha reducido de los 400 milisegundos de arco en Gaia DR2 a los 180 en Gaia EDR3.

#### LO APRENDIDO EN LA FASE DE VALIDACIÓN

Los datos que ahora se publican han sido sometidos a rigurosos procesos de validación en términos de integridad, precisión y exactitud. Fruto de esta ingeniería labor, la comunidad DPAC ofrece a los usuarios una lista de recomendaciones (Fabricius et al., 2020), como por ejemplo, cómo tratar el punto cero en los paralajes o los paralajes negativos, cómo realizar un buen uso de la fotometría de las fuentes débiles y/o los indicadores de calidad, etc. Esta publicación es, sin duda, de lectura imprescindible para un buen uso de los datos. Las tareas de validación han demostrado la importante mejora en la astrometría y la fotometría de las estrellas brillantes ( $G < 13$ ), y se ha comprobado que muchos de los efectos sistemáticos

que mostraban los datos de Gaia DR2 debidos, en gran parte, a la luz zodiacal y la ley de barrido han sido eliminados (Figura 3).

Si bien los satélites Hipparcos y Gaia fueron diseñados para medir paralajes absolutos, sin error en el punto cero, se ha demostrado que este potencial es susceptible de verse afectado por los efectos instrumentales. Hoy sabemos que el corrector de ángulo básico que Gaia lleva incorporado funciona bien pero, aún así, no se han podido excluir pequeñas variaciones que provocan un punto cero global en el paralaje. En EDR3 se han usado datos de cuásares, cúmulos abiertos, sistemas binarios e información externa para ajustar este factor y, por primera vez, establecer su dependencia con la magnitud, la posición y el color de la fuente (Lindegren et al. 2020). El punto cero medio en el paralaje en EDR3 se ha establecido en 17 microsegundos de arco.

#### PRIMEROS AVANCES CIENTÍFICOS

EDR3 abre una nueva etapa e indudablemente irá sumando nuevos descubrimientos a los logros alcanzados con DR2. Varios han sido los primeros logros liderados por la comunidad española: identificamos y

cuantificamos las sobredensidades en el espacio fase de procesos fuera del equilibrio en el disco galáctico; medimos la historia de formación estelar asociada a los procesos perturbativos involucrados; se nos plantean grandes retos en la modelización de la evolución estelar, como son las nuevas trazas en la región del diagrama HR correspondiente a las enanas blancas o esas ramas bien diferenciadas de estrellas de alta velocidad (Enceladus); vislumbramos procesos mucho más complejos en la zona de las enanas ultra-frías; vemos por primera vez los procesos de cristalización de las enanas blancas; trazamos las ocultaciones con precisión nunca vista, y así un sin fin de nuevos descubrimientos, que irán acompañados de los grandes cartografiados en curso y futuros.

Fruto de las tareas de validación, la comunidad DPAC ha publicado cuatro “*Gaia performance verification papers*” cuyo objetivo ha sido trabajar codo con codo con el equipo de validación para demostrar la coherencia y calidad científica de los datos EDR3. Mencionamos aquí sólo algunas de las “novedades” que encierran estos artículos. Os emplazamos también a la lectura del artículo “*Gaia: una escalera (de caracol) hacia el conocimiento*” que aparece en este mismo Boletín.

### Buceando en la burbuja local (100 parsecs)

Los catálogos de estrellas en la vecindad solar han constituido históricamente un elemento de extrapolación fundamental para la comprensión de las partes más alejadas del Universo. En Smart et al. (2020) hemos realizado un censo de 331312 estrellas dentro de un radio de 100 pc alrededor del Sol. Esto supone un incremento muy sustancial en tamaño (volumen y número de fuentes), pero sobre todo en calidad, respecto de las 5835 fuentes en la última actualización del Catalogue of Nearby Stars (hasta 25 pc incluyendo paralajes de Hipparcos, Figura 4). Para ello, hemos desarrollado modelos estadísticos para separar las fuentes reales de la contaminación que introducen los paralajes espurios (explicados en Lindegren et al. 2020). También hemos inferido con técnicas bayesianas la distribución de probabilidad de la distancia a partir de los paralajes medidos proporcionados por Gaia. Estimamos que la completitud del catálogo se sitúa en torno al 95% para los tipos espectrales hasta M8 (a partir del cual la completitud decae rápidamente; ver Figura 4). Para demostrar el enorme potencial de esta muestra hemos estimado funciones de luminosidad muy precisas para distintas poblaciones y hemos estudiado

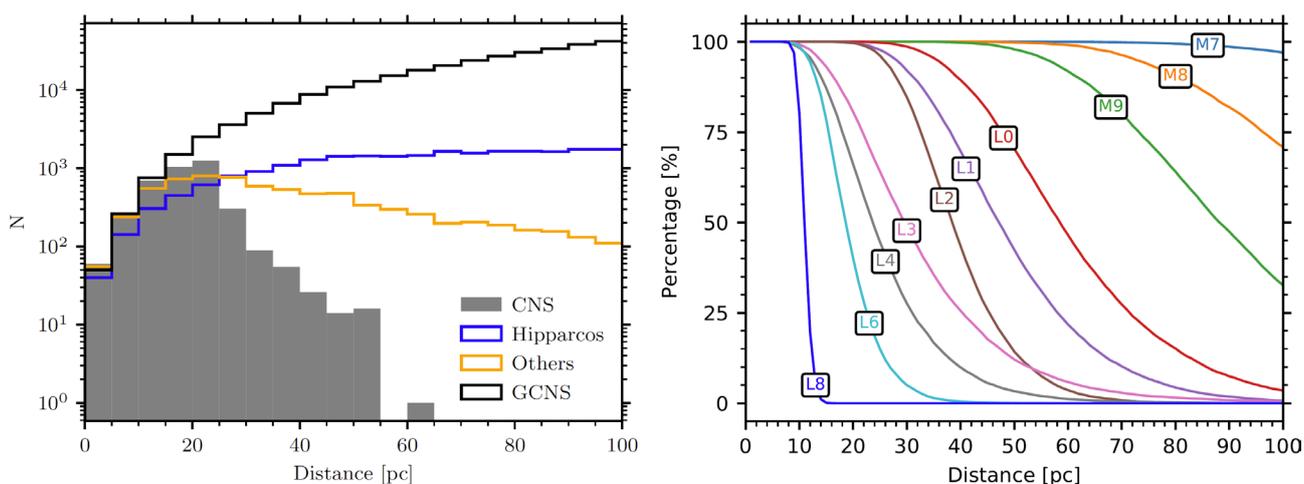


Figura 4: Izquierda: Distribución de las 331 312 estrellas a distancia inferior a 100 pc del catálogo Gaia Catalogue of Nearby Stars. (GCNS, Smart et al. 2020) y su comparación con catálogos anteriores (Hipparcos y CNS). Derecha: Porcentaje de completitud en función del tipo espectral. Se ha estimado que este catálogo contiene ya el 92% de las estrellas con tipo espectral más temprano que M9. (Crédito: Gaia Collaboration, R. Smart, et al. A&A 2020).

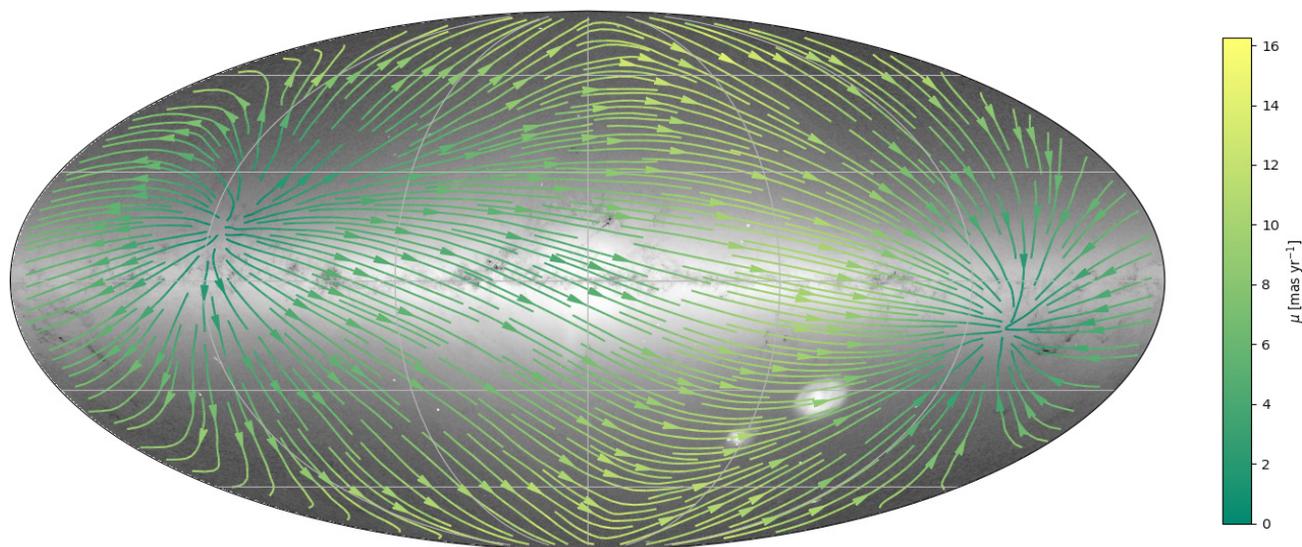


Figura 5: El cielo en movimiento. La figura muestra el movimiento propio medio en diferentes puntos del cielo, composición del movimiento del Sol respecto del Local Standard of Rest (término dominante) más la rotación diferencial de la Vía Láctea. (Crédito: A.G. Brown).

las propiedades de sistemas binarios y enanas blancas. Además, hemos analizado las propiedades dinámicas de las diferentes subpoblaciones (incluyendo la detección y estudio de miembros de Gaia Enceladus o de la Híades), o la velocidad solar respecto del *Local Standard of Rest* (Figura 5), por citar sólo algunos de los resultados presentados.

### El movimiento de las estrellas en el puente de Magallanes

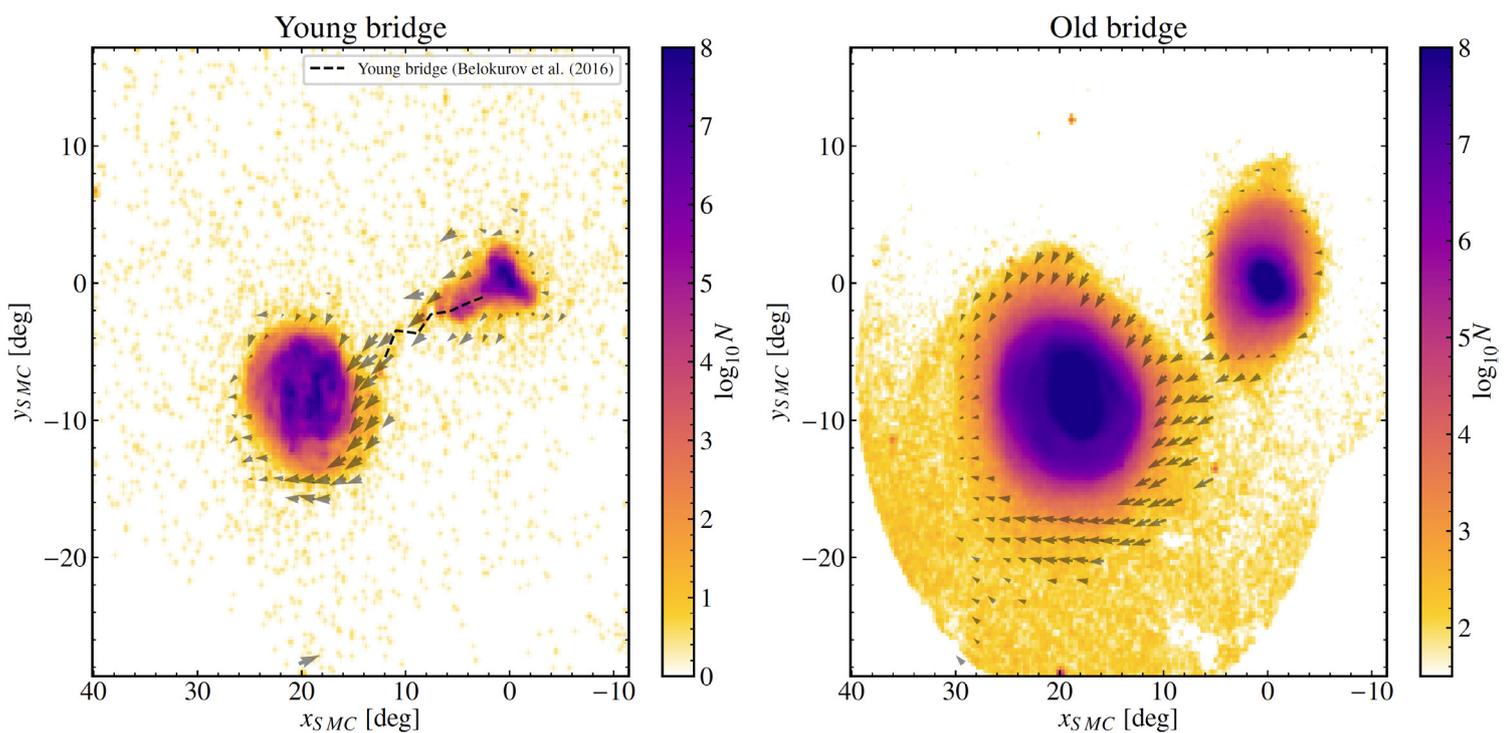
La precisión de los nuevos datos en posición, paralaje, movimiento propio y fotometría han permitido aplicar estrategias más sofisticadas a la selección de la componente estelar de las dos Nubes de Magallanes y su clasificación en ocho poblaciones según edad. Una vez eliminada la contaminación de la componente galáctica, EDR3 ofrece un catálogo de 11.1 y 1.8 millones de fuentes con los cinco parámetros astrométricos y fotometría completa en la Grande y la Pequeña Nube de Magallanes respectivamente (Luri et al. 2020). El estudio confirma que los errores sistemáticos en el paralaje, significativamente

«Más de 3500 artículos con arbitraje, con más de un millón de lectores, han usado los datos de Gaia-DR2.»

reducidos respecto a DR2 pero aún presentes (Figura 6), siguen siendo un factor limitante a la hora de establecer la geometría 3D de ambos sistemas. No obstante, el avance en el estudio del movimiento en las Nubes es significativo. Por primera vez se puede trazar, para cada una de las fases evolutivas, la componente ordenada y aleatoria del movimiento en el interior de la Nube Grande. También se han podido analizar las estructuras en sus partes externas y en el puente (Figura 6). Al enmascarar las estrellas de las Nubes y la Vía Láctea, logramos resaltar las tenues subestructuras (corrientes estelares) que se encuentran en sus halos. Los datos de EDR3 confirman la presencia del “puente” entre las dos Nubes (tanto en distribución espacial como en la distribución de velocidades), más marcado en las poblaciones jóvenes young bridge y que se difumina para poblaciones más viejas.

«Gaia-EDR3 mejora en un factor 2 la precisión en el movimiento de 1.5 mil millones de estrellas.»

Figura 6: Movimiento de la componente estelar joven (izquierda) y vieja (derecha) que forman los dos puentes de conexión entre las Nubes de Magallanes. Las coordenadas están centradas en la Pequeña Nube de Magallanes. (Crédito: Gaia Collaboration, X. Luri, et al. A&A 2020).



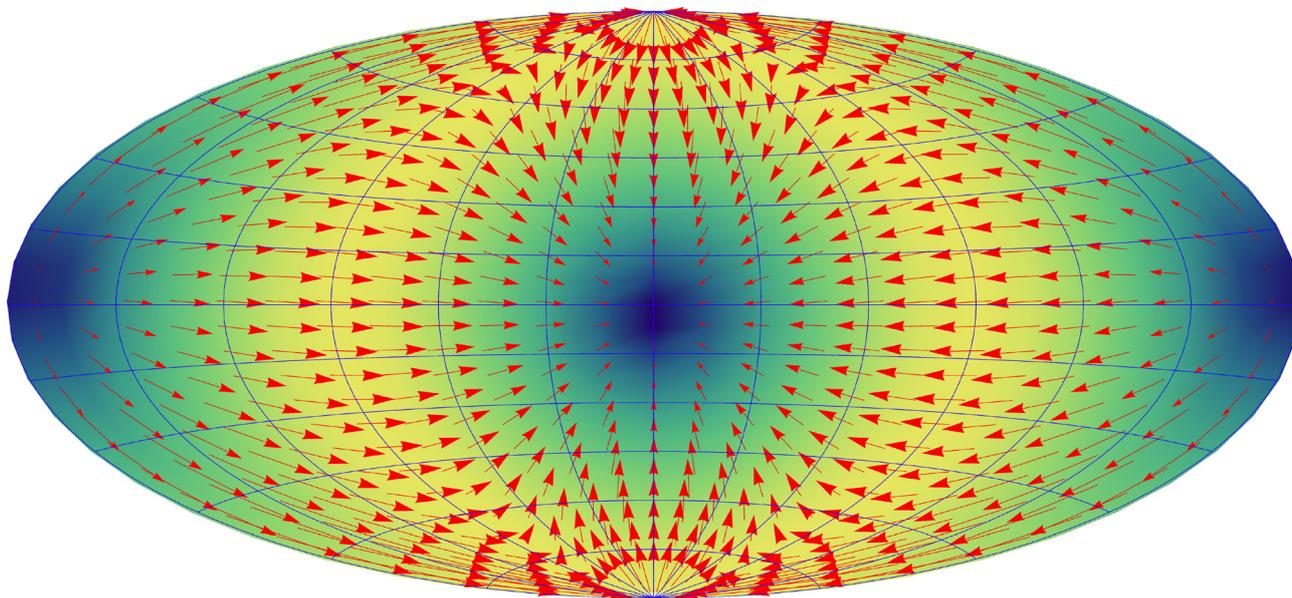


Figura 7: Patrón sistemático del campo de movimientos propios de los cuásares debido a la aceleración del baricentro del sistema solar respecto al sistema de referencia en reposo del Universo. Se muestra la proyección en coordenadas galácticas, con el centro galáctico en la posición central. Este patrón ha permitido estimar la aceleración centrípeta del sistema solar hacia el centro galáctico. (Crédito: S. Klioner).

### La aceleración del Sol respecto al sistema inercial de cuásares

Por primera vez el patrón sistemático del movimiento propio de 1.2 millones de cuásares ha sido usado para determinar la aceleración del baricentro del sistema solar con respecto al sistema de referencia en reposo del Universo (Figura 7). Los resultados muestran que el vector aceleración del Sol apunta, actualmente, en la dirección  $(l,b)=(358.9^\circ,-3.28^\circ)$ , unos pocos grados desviado de la posición del agujero negro central Sgr A\*, separado éste unos 3.3' y 2.7' del cero en longitud y latitud galáctica, respectivamente (Klioner et al. 2020). Con una precisión relativa mejor que el 10%, estos 34 meses de misión han permitido medir una aceleración de  $7.33 \pm 0.51$  km/s/Myr, valor que concuerda con las expectativas teóricas derivadas de los actuales modelos de potencial galáctico. Debemos esperar a los datos de DR4 o posteriores para esclarecer si esta aceleración incluye otras contribuciones del espacio intergaláctico además del movimiento del Sol respecto a

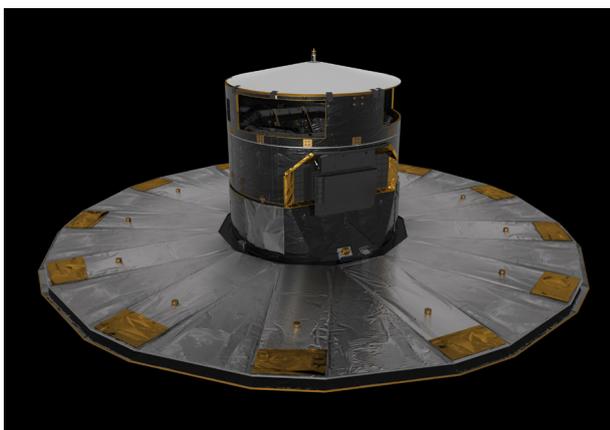
nuestra galaxia. Actualmente estimamos que los errores en esta aceleración se reducirán en un factor 0.35 y 0.15 respectivamente en DR4 (66 meses de datos) y DR5 (120 meses). ¡Impresionante!

### DR3 Y LA PUBLICACIÓN DE MILLONES DE ESPECTROS

Gaia DR3, esperado para el primer semestre de 2022, contará con un nuevo “producto estrella”, la primera publicación de los espectros de baja resolución en las bandas azul y roja (BP y RP) y de los espectros de resolución intermedia, obtenidos por el instrumento RVS (Radial Velocity Spectrometer) que opera en la zona del triplete del calcio (840-880 nm). El punto de partida del análisis de estos datos es la clasificación de las fuentes observadas entre los tipos astronómicos principales, con una clara preponderancia de fuentes estelares frente a fuentes extragalácticas no extensas, galaxias y cuásares. DR3 presentará a la comunidad su censo completo, incluyendo la naturaleza física de las fuentes y sus principales parámetros astrofísicos. Aquellas fuentes cuya espectrofotometría no se

ajuste adecuadamente a modelos serán clasificadas mediante un método de inteligencia artificial (IA) no supervisado, los mapas auto-organizados (SOM) que ha sido desarrollado en la Universidad de Coruña (UdC) por el Grupo Gallego de Gaia. Los mapas SOM permitirán aislar objetos con espectros peculiares, y potencialmente descubrir nuevos tipos de objetos nunca antes observados.

Contaremos también con nuevas velocidades radiales para decenas de millones de fuentes y con información química para un subconjunto de estas. Se publicarán nuevas estimaciones de los parámetros físicos de centenares de millones de estrellas, obtenidos estos al combinar la información derivada del paralaje, la fotometría y los espectros. También nueva información sobre binariedad, variabilidad y por primera vez datos sobre objetos extensos. Para más de 100000 objetos del sistema solar se publicarán datos astrométricos y fotométricos de cada uno de los tránsitos adquiridos por Gaia. También como novedad, se harán públicas las series temporales fotométricas para un millón de fuentes en un campo de 5.5 grados centrado en Andrómeda (M31).



### EN MARCHA EL PROCESADO DE LOS 66 MESES DE MISIÓN

Desde 2019 el consorcio DPAC está trabajando en el procesado de los 66 meses de misión, periodo que supera los 5 años de misión nominal. Dichos datos plantean el reto de procesar un total de 142 mil millones de tránsitos. La experiencia adquirida por los equipos de ingeniería y la excelente calidad de los datos han permitido centrar los esfuerzos no solo en la optimización de diversos códigos ya existentes en la cadena de procesado, sino también en plantear la incorporación de nuevas estrategias que permitirán acelerar el ritmo de mejora en la calidad de los datos. A continuación citamos algunos ejemplos en los que los equipos de ingeniería de la UB y ESAC están jugando un papel fundamental. Se está trabajando en la inclusión del paralaje en la tarea de cruzado y asignación de observaciones a las fuentes (proceso de *cross-match*). Ello, junto el incremento del periodo de tiempo de datos, mejora significativamente el modelo de asignación y agrupamiento, y por tanto la calidad astrométrica de las fuentes. Por otra parte, la actualización de datos intermedios (IDU), uno de los sistemas más exigentes que se ejecuta en Mare-*Nostrum* (BSC), irá un paso más allá proporcionando salidas no solo para las fuentes ya detectadas a

«Por primera vez Gaia mide la aceleración del sistema solar con respecto al sistema de referencia de los cuásares.»

CURRENT DATE AND TIME	2020-12-04T11:29:12 (TCB)
MISSION STATUS	
Satellite distance from Earth (in km)	1,549,661
Number of days having passed since 25 July 2014	2324
Number of days in mission extension	507
OPERATIONS DATA (collected since 2014/07/25)	
Volume of science data collected (in GB)	86,633
Number of object transits through the focal plane	164,520,241,776
Number of astrometric CCD measurements	1,621,699,526,072
Number of photometric CCD measurements	327,197,156,052
Number of spectroscopic CCD measurements	31,945,885,689
Number of object transits through the RVS instrument	10,708,017,871

Tabla 1: Gaia en cifras.

bordo sino también para nuevas detecciones de fuentes obtenidas al realizar un primer procesado de la información recibida. Esto se traducirá directamente en un aumento en la resolución angular del catálogo Gaia, fundamental para el estudio de los sistemas binarios. Hace unas semanas se completó la primera ejecución completa del *cross-match* de observaciones incluyendo estos 66 meses de datos; se requirieron un total de 750.000 horas de CPU en MareNostrum, utilizando hasta 80 nodos. Más vertiginosa es la cifra de 1E21 operaciones de coma flotante (FLOPs), requeridas para el procesado de EDR3, y la de 1E22 FLOPs, estimada para el tratamiento de los datos a final de misión (ver Tabla 1, “Gaia en cifras”, actualizada día a día en las páginas ESA de la misión).

### ¿Y HASTA CUANDO EN L2?

Recientemente ESA ha aprobado oficialmente la segunda extensión de la misión hasta finales de 2022, momento en el que, si todo sigue funcionando como

hasta ahora, se habrán alcanzado los 7.5 años de operación científica con éxito. ESA ha comunicado también la confirmación indicativa de lo que será la tercera y última extensión, que se espera sea a finales de 2024 o inicio de 2025, cuando se habrá agotado el combustible de micro propulsión necesario para el funcionamiento del instrumento. Diez años de misión supondrán, en relación a la misión nominal (DR4), un factor 1.4 en la mejora de la precisión en paralaje, en fotometría y en velocidad radial, y un factor 2.8 en los movimientos propios. Además, mejorará hasta un factor 20 la precisión en el movimiento de sistemas binarios, planetas, y otros. Dejamos para el próximo artículo la descripción de esta ciencia adicional que soñamos podremos alcanzar en esta fase de extensión. Completar estos diez años de adquisición y procesado de datos era, sin duda, una quimera a finales del siglo pasado, cuando de la mano de Jordi Torra iniciamos esta andadura. Hoy nos acercamos a esta realidad.

Abreu Aramburu, A. (ATG/ESAC)	Gavras, P. (RHEA/ESAC)	Molina, Daniel (ICCUB-IEEC)
Aguado, J.J. (UNED)	Garabato, Daniel (UdC)	Mor, Roger (ICCUB-IEEC)
Alvarez, Marco Antonio (UdC)	García-Lario, Pedro (ESAC)	Mora, Alcione (Aurora/ESAC)
Anglada-Varela, E. (ATG/ESAC)	García-Gutierrez, Albert (ICCUB-IEEC)	Murphy, C.P. (ESAC)
Antoja, Teresa (ICCUB-IEEC)	García-Reinaldos, M. (ESAC)	Osinde, J. (RHEA/ESAC)
Baines, D (Telespazio/ESAC)	García-Torres, M. (UPO)	Peñalosa Esteller, Xavier (ICCUB-IEEC)
Bakker, Jorgo (ESAC)	Girona, Sergi (BSC)	Portell, Jordi (ICCUB-IEEC)
Balaguer-Núñez, Lola (ICCUB-IEEC)	Gómez, A (UdC)	Racero, E. (UCM)
Bartolomé, Sergi (ICCUB-IEEC)	Gonzalez, Santamaria, Iñaki (UdC)	Ramos, Pau (ICCUB-IEEC)
Bernet, Marcel (ICCUB-IEEC)	Gonzalez-Núñez, J. (ESAC, UVigo)	Ramos-Lerate, Mercedes (Vitrociset/ESAC)
Bombrun, Alex (HE/ESAC)	González-Vidal, Juan Jose (ICCUB-IEEC)	Romero-Gómez, Mercè (ICCUB-IEEC)
Canovas, H. (Aurora/ESAC)	Gracia-Abril, Gonzalo (PO/ESAC)	Sahlmann, J. (RHEA/ESAC)
Cantat-Gaudin, Tristan (ICCUB-IEEC)	Guerra, Rocio (ESAC)	Salgado, J. (Telespazio/ESAC)
Carballo, Ruth (UNICAN)	Gutiérrez-Sánchez, R. (Telespazio/ESAC)	Salguero, E. (ATG/ESAC)
Carrasco, Josep Manel (ICCUB-IEEC)	Hernández, José (ESAC)	Sanchez Gimenez, Víctor (ICCUB-IEEC)
Castañeda, Javier (DAPCOM/ICCUB-IEEC)	Hidalgo, Sebastian L. (IAC)	Santoveña, Raul (UdC)
Castro-Ginard, Alfred (ICCUB-IEEC)	Hladczuk, N. (ESAC)	Sarro, L.M. (UNED)
Castro Sampol, Pau (ICCUB-IEEC)	Hutton, Alex (Aurora/ESAC)	Segovia, J.C. (Serco/ESAC)
Cheek, N. (Serco/ESAC)	Jordi, Carme (ICCUB-IEEC)	Solano, Enrique (CAB)
Crowley, C. (HE/ESAC)	Julbe, Francesc (ICCUB-IEEC)	Stephenson, C.A. (Telespazio/ESAC)
Dafonte, Carlos (UdC)	Lammers, Uwe (ESAC)	Teyssier, David (PO/ESAC)
Delgado, H.E. (UNED)	Lorca, A. (Aurora/ESAC)	Torra, Ferran (DAPCOM/ICCUB-IEEC)
Del Pozo, Enrique (Aurora/ESAC)	Luri, Xavier (ICCUB-IEEC)	Torra, Jordi (ICCUB-IEEC)
De Teodoro, Pilar (ESAC)	Madrero Pardo, Pau (ICCUB-IEEC)	Ulla, Ana (UVigo)
De Torres, A. (HE/ESAC)	Manteiga, Minia (UdC)	Utrilla, Enrique (Aurora/ESAC)
Esquej, Pilar (RHEA/ESAC)	Marcos Santos, M.M.S. (Serco/ESAC)	Van Reeve, Wouter (Aurora/ESAC)
Fabircius, Claus (ICCUB-IEEC)	Martín-Fleitas, J.M. (Aurora/ESAC)	Weiler, Michael (ICCUB-IEEC)
Fernández-Hernández, J. (ATG/ESAC)	Martín Polo, L. (Serco/ESAC)	
Figueras, Francesca (ICCUB-IEEC)	Masana, Eduard (ICCUB-IEEC)	
Fraile, E. (RHEA/ESAC)	Masip, Albert (ICCUB-IEEC)	

Tabla 2: Gaia en nombres. El consorcio DPAC (Data Processing and Analysis Consortium) reúne a más de 450 científicos e ingenieros europeos y es el responsable del procesado y publicación de los datos. Un total de 87 miembros de este consorcio pertenecemos a universidades y centros de investigación en España (ICCUB-IEEC, ESAC, UdC, BSC, UNED, CAB, UVigo, UniCan, IAC, UCM). Entre todos hemos hecho realidad esta nueva publicación de datos (Gaia-EDR3). España cuenta, además, con la Red Española para la explotación científica de Gaia (REG). Esta red temática fue creada en el año 2010 y cuenta en la actualidad con 190 investigadoras e investigadores. Está abierta a toda la comunidad astronómica española y promueve el intercambio científico en todas aquellas líneas relacionadas con la explotación científica de los datos de la misión.

## ARTÍCULOS PUBLICADOS SIMULTÁNEAMENTE AL LANZAMIENTO DE EDR3

A continuación relacionamos los artículos que, elaborados por la Colaboración Gaia DPAC, se han publicado en paralelo a los datos de EDR3.

Antoja, T., et al., Gaia EDR3: The Galactic Anticenter, A&A 2020  
 Gaia Collaboration, Brown, A.G.A., et al., Gaia EDR3: Summary of the contents and survey properties, A&A 2020  
 Fabricius, C., et al., Gaia EDR3: Catalogue validation, A&A 2020  
 Gaia Collaboration et al., Gaia EDR3: The celestial reference frame, A&A 2020  
 Klioner, S.A., et al., Gaia EDR3: Acceleration of Solar System from Gaia astrometry, A&A 2020  
 Lindegren, L., et al., Gaia EDR3: Astrometric solution, A&A 2020

Lindegren, L., et al., Gaia EDR3: Parallax bias versus magnitude, colour, and position, A&A 2020  
 Luri, X., et al., Gaia EDR3: Structure and properties of the Magellanic Clouds, A&A 2020  
 Marrese, P., et al., Gaia EDR3: Cross-match with external catalogues - Algorithm and results, A&A 2020  
 Riello, M., et al., Gaia EDR3 - Photometric Content and validation, A&A 2020  
 Rowell, N., et al., Gaia EDR3: Modelling and calibration of Gaia's point and line spread functions, A&A 2020  
 Seabroke, G.M., et al., Gaia EDR3: Updated Radial Velocities from DR2, A&A 2020  
 Smart, R., et al., Gaia EDR3: The Gaia catalogue of nearby stars, A&A 2020  
 Torra, F., et al., Gaia EDR3; Building the Gaia DR3 source list — Cross-match of Gaia observations, A&A 2020

# GAIA: UNA ESCALERA (DE CARACOL)

Ya sospechábamos que los datos de la misión Gaia de la Agencia Espacial Europea revolucionarían la Astrofísica Galáctica. Al fin y al cabo, esta misión de la Agencia Espacial Europea fue diseñada justamente para esto. La cantidad de datos recolectados por este satélite es, sin duda alguna, inaudita dentro del campo de la astronomía. La excelente calidad de las medidas tampoco tiene precedentes. Todo esto ha permitido grandes avances en diversas áreas de la astrofísica, desde el estudio de las enanas blancas, la detección de cientos de cúmulos abiertos nuevos, el descubrimiento de un evento de acreción de una galaxia satélite masiva en el pasado de la Galaxia, hasta la re-calibración de la escala cósmica de distancias y las fuertes implicaciones sobre la constante de Hubble que esto ha conllevado.



Teresa Antoja

Institut de Ciències del Cosmos,  
Universitat de Barcelona, IEEC-UB  
[tantoja@fqa.ub.edu](mailto:tantoja@fqa.ub.edu)

Pau Ramos

Observatoire astronomique de Strasbourg,  
Université de Strasbourg, CNRS  
[p.ramos@unistra.fr](mailto:p.ramos@unistra.fr)

No obstante, en este artículo nos centramos en los hallazgos de Gaia sobre el disco de la Galaxia. Todos estos apuntan a que vivimos en un disco Galáctico muy complejo, perturbado por múltiples mecanismos y que está en un estado de claro no-equilibrio.

Pero empecemos desde el principio. Antes de Gaia sólo se habían podido medir posiciones y velocidades para unas 300000 estrellas de la Vía Láctea (un 0,0003% de las cerca de  $10^{11}$  que se calcula que podría tener en total), todas ellas muy cercanas al Sol. El satélite Gaia, lanzado en diciembre de 2013 gracias a la participación de unos 500 científicos e ingenieros de toda Europa, y con una importante contribución española (por ejemplo, las aportaciones en diseño y fabricación del satélite por parte de empresas españolas del sector espacial es de un 11,5%, además de la participación de decenas de científicos e ingenieros directamente involucrados en distintas unidades del proceso y validación de los datos), consiguió aumentar esa cifra más allá del millar de millones (alcanzando un 1% del total) con la publicación de datos astrofísicos que tuvo lugar en abril de 2018 (segundo data release, Gaia DR2). Para 7 millones de estas estrellas, una muestra pequeña en comparación pero inmensa de todas formas, se obtuvieron distancias, velocidades radiales y movimientos propios, permitiendo una determinación de todas las coordenadas del espacio de fases (3 posiciones y 3 velocidades, muestra 6d). La muestra 6d se extendía mucho más lejos que cualquier catálogo anterior, permitiendo la exploración de regiones lejanas al Sol que nunca antes habían sido investigadas, y contaba además con precisiones en la velocidad del orden de 1 km/s, un orden de magnitud inferior a los errores de la mayoría de medidas anteriores.

## UN DISCO QUE NO ESTÁ EN EQUILIBRIO, RETO PARA LA DINÁMICA GALÁCTICA

Este aumento del número de estrellas y de la precisión de las velocidades medidas por Gaia permitieron detectar unas subestructuras sorprendentes en el espacio de fases que nos eran desconocidas. En primer lugar se descubrió una *forma espiral* (Antoja et al. 2018, Nature, Figura 1) que aparece en el espacio de fases vertical, es decir, cuando graficamos la altura de las estrellas sobre el disco contra sus velocidades verticales. Esta forma espiral indica que las estrellas están en una situación de no equilibrio

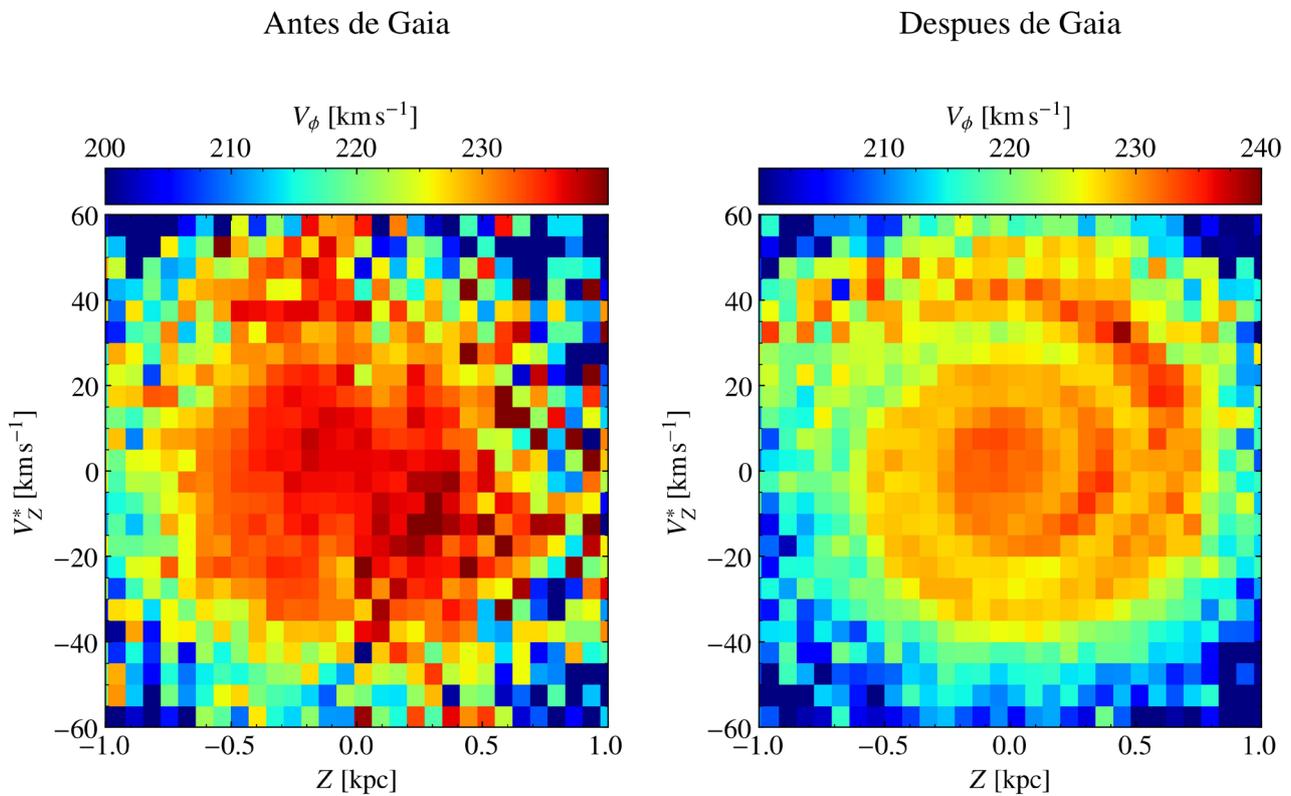


Figura 1: Forma espiral en el espacio de fases vertical. Las figuras muestran la altura sobre el disco (eje horizontal) y la velocidad vertical (eje vertical) de las estrellas, medidas antes (izquierda) y después (derecha) de la llegada de los datos de Gaia DR2. La forma espiral era indistinguible antes de Gaia y nos indica que el disco sufrió una perturbación hace unos 300-900 millones de años. El color de las figuras muestra la velocidad de rotación de las estrellas alrededor del centro galáctico, lo que implica una correlación entre las velocidades verticales y las de rotación. La espiral fue descubierta con datos de DR2 de Gaia (Antoja et al. 2018, Nature) pero aquí se muestra con los nuevos datos de Gaia EDR3.

dinámico posiblemente debido a una significativa perturbación que tuvo lugar en el pasado.

En esta proyección del espacio de fase cada estrella gira alrededor del centro en sentido horario trazando un óvalo, alcanzando su máxima velocidad cuando pasa por el plano Galáctico ( $Z=0$ ) y velocidad nula ( $V_Z=0$ ) cuando está en su altura máxima por encima o por debajo del plano. Sin embargo, cada estrella puede tener una frecuencia de oscilación en  $Z$  diferente: en particular las estrellas con oscilaciones más pequeñas giran en esta proyección más rápida-

mente. Si en algún momento una perturbación sitúa todas las estrellas en una región particular de este diagrama, las estrellas reiniciarán sus oscilaciones, cada una con su frecuencia vertical particular, y la distribución global evolucionará hacia una forma espiral que se va enrollando más y más con el tiempo. Un animación de este fenómeno, llamado mezclado de fases, se puede [consultar online](#).

Así como los anillos del árbol nos indican su edad, un modelado de estas observaciones nos permitió determinar que la perturbación ocurrió hace unos

«Gaia-EDR3 descubre nuevas sobredensidades en el espacio posición-velocidad en los confines del disco galáctico, a distancias de 18 kpc del centro.»

300-900 millones de años y que, posiblemente, la causante de tal alteración fue la galaxia enana de Sagitario (Antoja et al. 2018 Nature; Binney & Schonrich 2018 MNRAS; Laporte et al 2019 MNRAS). Se cree que alrededor de ese tiempo Sagitario se encontraba en el punto de su órbita más cercano a la Vía Láctea, lo cual haría que las estrellas del disco sintieran con intensidad las fuerzas de marea inducidas por la gran masa de este satélite.

Por un lado, el descubrimiento da esperanzas a poder conocer mejor esta perturbación pasada ya que con el estudio detallado de la forma espiral y la comparación con simulaciones deberíamos poder poner límites a la masa de Sagitario y a su órbita. Algunos estudios posteriores (Laporte et al. 2019, MNRAS) han especulado que incluso podríamos buscar señales de perturbaciones todavía más antiguas inducidas por otras galaxias en la proyección  $Z-V_z$  a radios galactocéntricos más alejados.

Por otro lado, otra de las implicaciones del hallazgo de la forma espiral es que el disco de la Vía Láctea cambia con el tiempo y es más sensible a las perturbaciones externas de lo que antes se creía. De esta forma se pone en cuestión el equilibrio dinámico del disco que suele asumirse en la mayoría de modelos. Para poner un ejemplo, se ha demostrado que las ecuaciones de Jeans que se utilizan para medir la cantidad de materia oscura local, y en las que se asume precisamente equilibrio dinámico, pueden dar medidas erróneas, en particular sobreestimadas, cuando se aplican a un disco con una perturbación parecida a la que observamos (Haines et al., 2019, ApJ).

**UN DISCO MUY COMPLEJO: DEBATE SOBRE PERTURBACIONES INTERNAS O EXTERNAS**

Otro tipo de subestructura del espacio de fases que nos desveló Gaia DR2 fueron unas líneas diagonales o crestas (Figura 2) que aparecen cuando graficamos las velocidades de rotación de las estrellas alrededor del centro Galáctico en función de su distancia al centro (Antoja et al. 2018, Nature; Kawata et al 2018, MNRAS; Ramos et al 2018, A&A). Estas líneas indican que algunas estrellas tienden a agruparse en ciertas órbitas preferentes. Sorprendentemente, los modelos han demostrado que tanto procesos internos (resonancias orbitales debidas

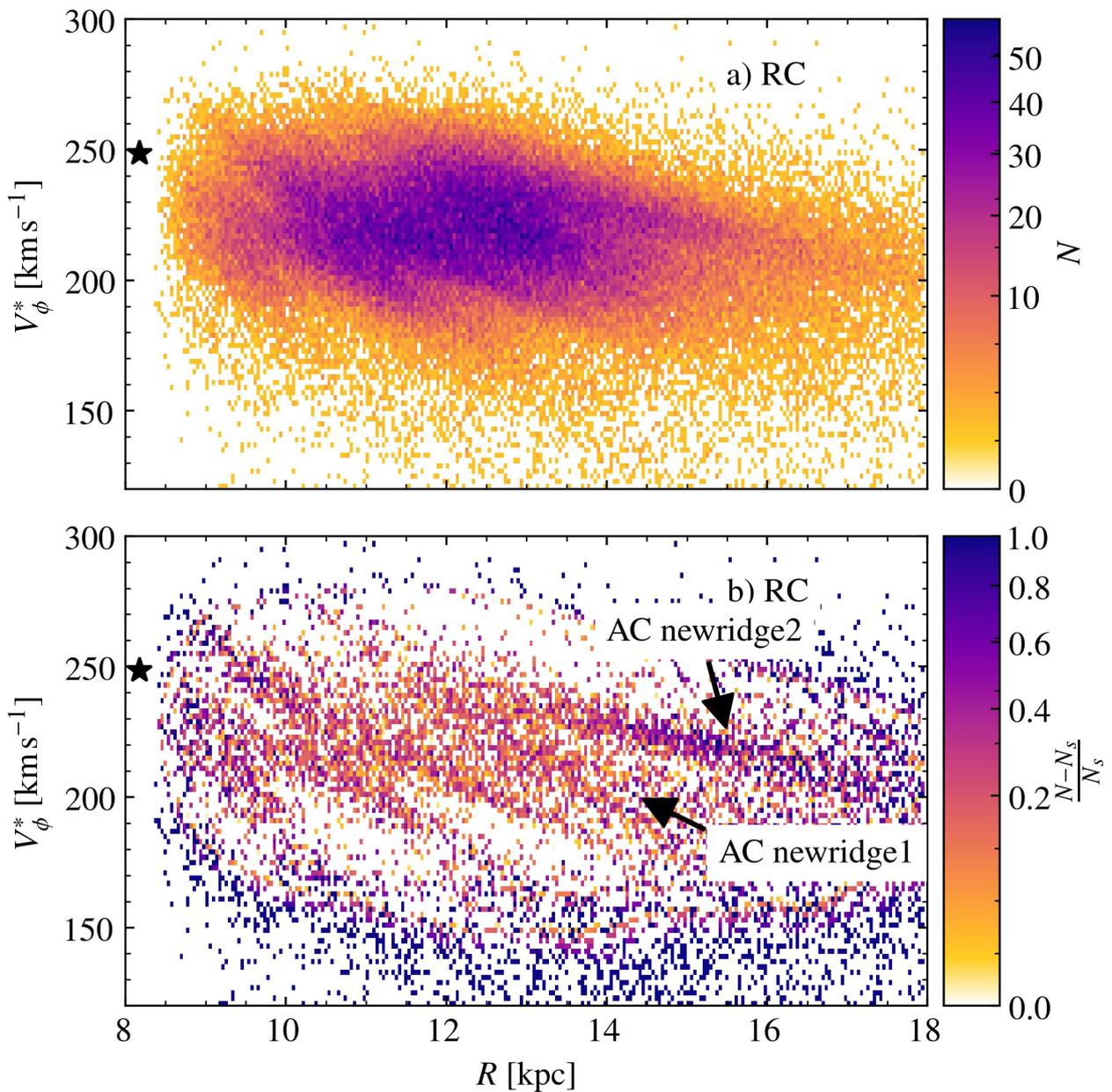


Figura 2: Crestas en el espacio de fases. Las figuras muestran el radio Galactocéntrico de las estrellas (eje horizontal) y sus velocidades de rotación alrededor del centro Galáctico (eje vertical). La estrella negra marca la posición del Sol en este diagrama. Todavía no se sabe del cierto qué mecanismo produce estas crestas, aunque se barajan distintas hipótesis: causadas por brazos espirales transitorios de la Galaxia, debidas a las resonancias de la barra o de los brazos espirales, o bien resultado de la perturbación de la galaxia satélite de Sagitario. Estas estructuras fueron detectadas por primera vez con Gaia DR2 (Antoja et al. 2018, Nature) pero aquí se muestran con nuevos datos de Gaia de EDR3 (Antoja et al, enviado a A&A), donde se pueden apreciar extendiéndose mucho más lejos y se han descubierto crestas nuevas (indicadas con flechas

«La forma espiral que  
mostró Gaia-DR2  
desvela un disco galáctico  
cambiante con el tiempo  
posiblemente debido a una  
perturbaciones externa.»

a los brazos espirales y/o barra o brazos espirales transitorios, Antoja et al. 2018 Nature; Frangkoudi et al 2019 MNRAS; Hunt et al. 2019 MNRAS) como procesos externos (interacción con galaxias satélite, Antoja et al. 2018 Nature; Laporte et al. 2019 MNRAS; Khanna et al. 2019 MNRAS) pueden producir estas crestas. Así pues no está claro qué procesos son exactamente los causantes de estas subestructuras observadas. La situación aún es más compleja, pues algunos estudios han planteado que la barra y los brazos espirales podrían estar causados por una perturbación de otra galaxia, con lo que en realidad estaríamos hablando de un acoplamiento entre mecanismos internos y externos difícil de desentrañar observacionalmente.

**SIN TIEMPO PARA DETENERNOS:  
NUEVOS Y MEJORES DATOS YA DISPONIBLES**

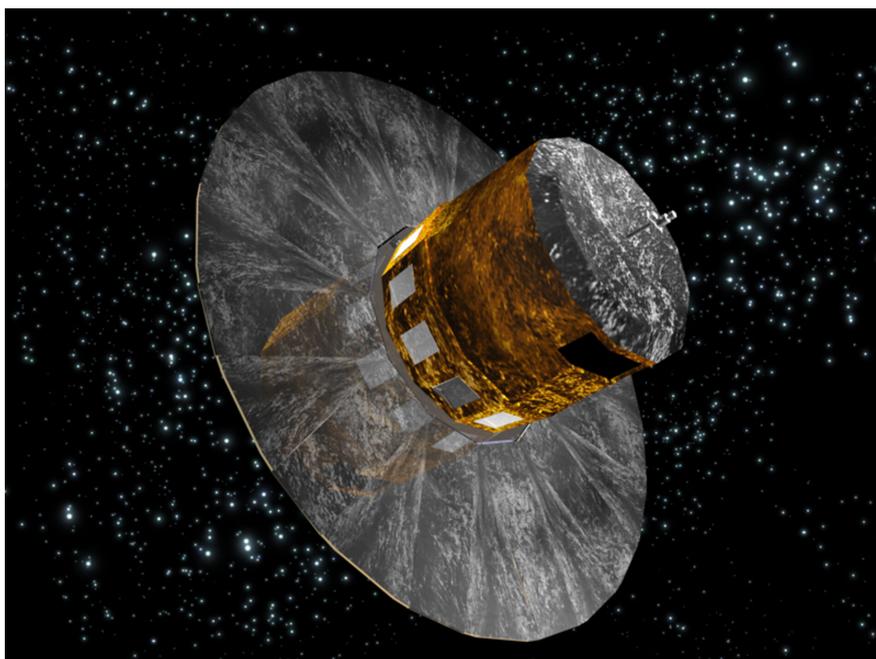
Después del gran impacto de Gaia DR2, el tercer release de la misión (Gaia Early DR3, EDR3), publicado el día 3 de diciembre, sigue desvelando nuevos aspectos del disco de la Galaxia. Ya la primera exploración básica presentada en uno de los artículos de verificación de los datos (Antoja et al. 2020, enviado a A&A), que acompañan siempre las publicaciones de los catálogos de Gaia, ha permitido, de nuevo, desvelar complejos y hasta hoy desconocidos comportamientos cinemáticos de las estrellas que conforman el disco. Esta vez, gracias a los 12 meses extra de observaciones, se ha obtenido una muestra mucho más extensa y con mejores precisiones astrométricas en la dirección del anticentro (4 millones comparado con los 3 millones de DR2 en esta dirección) y con errores reducidos a un factor 0.7 y 0.5 para paralajes y movimientos propios, respectivamente (ver artículo sobre Gaia EDR3 en este mismo boletín). Con estas mejoras ha sido posible explorar los confines de dicho disco en la dirección del anticentro, confirmando que éste se extiende más allá de lo que se creía (al menos hasta 18 kpc del centro galáctico). No solo eso, sino que los nuevos datos muestran cómo las crestas mencionadas anteriormente siguen estando presentes en radios galactocéntricos donde, en principio, las resonancias de la barra no deberían existir (Figura 2), apuntando a otros fenómenos causantes. También se han podido detectar unas evidentes asimetrías en las componentes verticales del espacio de fases para las que todavía no se tiene una clara explicación.

Sin duda la excepcionalidad de los datos de Gaia y las posibilidades que las simulaciones más modernas nos ofrecen, nos sitúan en el momento de máxima esplendor para los estudios de la formación y evolución de la Galaxia, en lo que muchos consideran una nueva era: la era de Gaia. Los primeros datos de la misión Gaia nos han ayudado a realizar avances significativos pero, lejos de servirnos para la determinación definitiva de la estructura y del pasado del disco de nuestra Galaxia, han hecho surgir nuevas dudas e incluso un cambio de paradigma en la dinámica galáctica. En el futuro, se esperan más catálogos de la misión Gaia, con más datos y más precisos: dado el buen funcionamiento de la misión, ésta ya ha sido extendida 4 años adicionales y se prevén más extensiones, hasta agotar el combustible que mantiene la nave en funcionamiento. También contaremos con datos de otros surveys como WEAVE, un proyecto con una alta participación española, que medirá millones de velocidades radiales estelares (datos previstos para 2021) con las que esperamos poder seguir descifrando la complejidad del disco de nuestra Galaxia.

#### REFERENCIAS:

- Antoja, T., Helmi, A., Romero-Gómez, M., et al. 2018, *Nature*, 561, 360
- Antoja, T., McMillan, P., Kordopatis, G., et al. 2020, enviado a *A&A*
- Binney, J. & Schönrich, R. 2018, *MNRAS*, 481, 1501
- Fragkoudi, F., Katz, D., Trick, W., et al., 2019, *MNRAS*, 488,3324
- Haines, T., D'Onghia, E., Famaey, B., et al., 2019, *ApJ*, 879, 15
- Hunt, J. A. S., Bub, M. W., Bovy, J., et al., 2019, *MNRAS*, 490,1026
- Kawata, D., Baba, J., Ciuca, I., et al. 2018, *MNRAS*, 479, L108
- Khanna, S., Sharma, S., Tepper-Garcia, T., et al. 2019b, *MNRAS*, 489, 4962
- Laporte, C. F. P., Minchev, I., Johnston, K. V., & Gómez, F. A. 2019b, *MNRAS*, 485, 3134
- Ramos, P., Antoja, T., & Figueras, F. 2018, *A&A*, 619, A72

Figura 3: Impresión artística de Gaia. Créditos: ESA/ATG medialab.



# ESPECTROPOLARIMETRÍA ULTRAVIOLETA

El 3 de septiembre de 2015 y el 11 de abril de 2019 se realizaron con éxito dos experimentos espaciales mediante un novedoso instrumento lanzado con cohetes suborbitales de la NASA. El Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter (CLASP-1) midió la intensidad (Stokes I) y polarización lineal (Stokes Q y U) de la radiación ultravioleta emitida por regiones en calma de la atmósfera solar en la línea Lyman- $\alpha$  del hidrógeno a 1215 Å. Por su parte, el Chromospheric Layer Spectro-Polarimeter (CLASP-2) midió la intensidad, la polarización lineal y la polarización circular (Stokes V) de la radiación ultravioleta emitida tanto por regiones en calma como activas en las líneas h y k del Mg II alrededor de 2800 Å. Ambos experimentos fueron motivados por investigaciones teóricas realizadas en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y se llevaron a cabo a través de un consorcio internacional liderado por EE. UU., Japón, Francia y España. Tales investigaciones han abierto una ventana para estudiar el campo magnético y geometría del plasma en las capas más externas de la cromosfera solar, muy cerca de la base de la corona.



Javier Trujillo Bueno  
Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC)  
<http://research.iac.es/proyecto/polmag/>  
[jtb@iac.es](mailto:jtb@iac.es)

La cromosfera es una región muy importante de la atmósfera solar, la cual se extiende unos pocos miles de kilómetros entre la relativamente delgada y fría fotosfera ( $T < 6000$  K) y la extensa y extremadamente caliente corona ( $T > 10^6$  K). Aunque la temperatura de la cromosfera sea mucho menor que la de la corona, el hecho de que el plasma cromosférico es mucho más denso implica que se necesita mucha más energía mecánica para mantener la cromosfera que la corona. La densidad del plasma en la atmósfera solar decrece exponencialmente varios órdenes de magnitud desde la fotosfera hasta la corona, más rápidamente que la intensidad del campo magnético. En consecuencia, la superficie corrugada donde la presión magnética iguala a la del gas se encuentra situada dentro de la cromosfera. Por encima de tal superficie donde  $\beta=1$  (siendo  $\beta$  el cociente entre tales presiones, con la del gas en el numerador) el campo magnético domina la estructura y dinámica del plasma. Esto y el hecho de que la energía mecánica necesaria para calentar la corona tiene que atravesar la cromosfera explica por qué ésta es realmente una región interfaz crucial para solucionar muchos de los problemas clave en física solar y estelar.

Es imposible descifrar toda la física de la cromosfera solar si no logramos determinar sus campos magnéticos, especialmente en las capas más externas donde  $\beta < 1$  y la temperatura del plasma es del orden de 10000 K. Para tal fin, necesitamos identificar y medir observables de la radiación solar que sean sensibles a la intensidad y orientación del campo magnético presente en tales regiones externas. Los fotones del centro de las líneas más intensas del espectro ultravioleta (UV) del Sol, tales como la línea Lyman- $\alpha$  del hidrógeno y las líneas h y k del magnesio ionizado, provienen de tales regiones cercanas a la base de la corona (véase la figura 1). Sin embargo, la intensidad de la radiación solar UV es prácticamente insensible al campo magnético.

## POLARIZACIÓN EN LÍNEAS ESPECTRALES

Los campos magnéticos de la atmósfera solar dejan su huella en la polarización del espectro solar (véase Landi Degl'Innocenti y Landolfi 2004). El mecanismo físico más conocido mediante el cual un campo magnético produce polarización en la radiación de una línea espectral es el efecto Zeeman, el cual es especialmente útil para cartografiar los campos magnéticos más intensos de la fotosfera a partir de la polarización

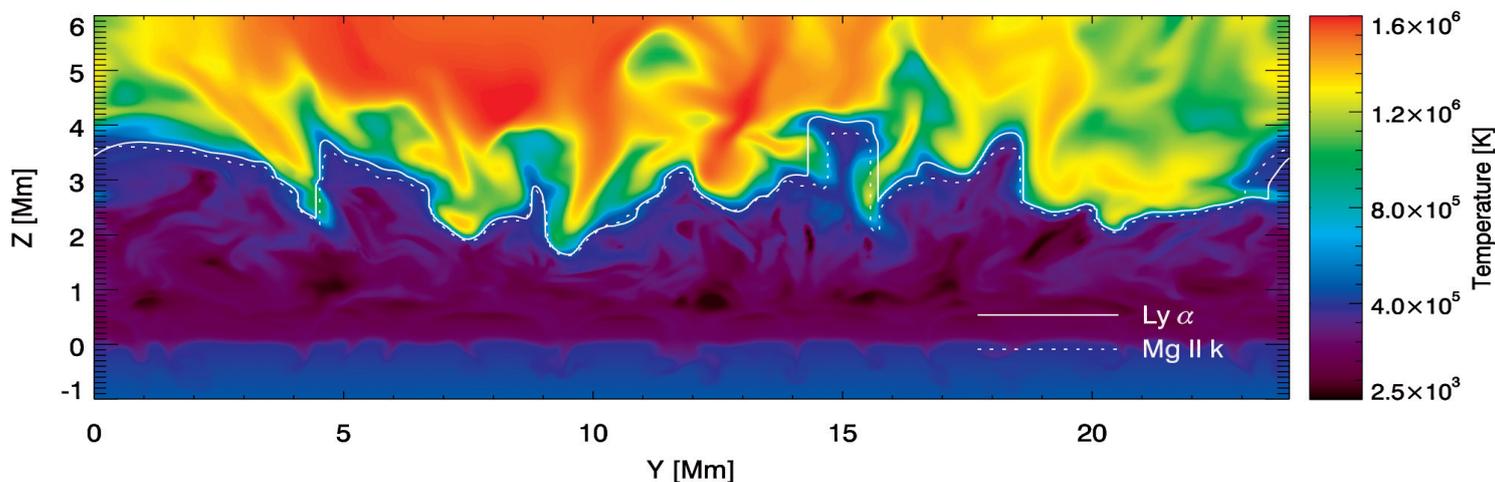


Figura 1: Visualización de la estructura de temperatura a través de un corte vertical en un modelo tridimensional (3D) de la atmósfera solar resultante de una simulación magneto-hidrodinámica (véase [Carlsson et al. 2016](#)). La curva continua muestra las alturas ( $Z$ ) en este modelo de donde provienen los fotones del centro de la línea Lyman- $\alpha$  del hidrógeno (nótese que coincide prácticamente con la superficie corrugada que delimita la delgada región de transición entre la cromosfera y la corona del modelo), mientras que la curva punteada indica las alturas de donde provienen los fotones del centro de la línea  $k$  del Mg II.

inducida en líneas visibles y del infrarrojo cercano. La amplitud de la polarización circular y lineal producida por el efecto Zeeman es aproximadamente proporcional a  $R$  y  $R^2$ , respectivamente, con  $R \sim \lambda B / \sqrt{T}$ . Es importante notar que, típicamente,  $R \ll 1$ , especialmente para las líneas UV (longitudes de onda  $\lambda$  pequeñas) que se originan en las capas externas de la cromosfera solar donde la intensidad ( $B$ ) de los campos magnéticos es menor y la temperatura ( $T$ ) más alta que en la fotosfera. Por lo tanto, la única firma observacional del efecto Zeeman que podemos aspirar a detectar en líneas cromosféricas del espectro UV es la polarización circular que se produce en regiones activas, siempre y cuando sus campos magnéticos no tengan sus polaridades mezcladas por debajo de la resolución espacio-temporal que podemos conseguir con los telescopios actuales. En resumen, el efecto Zeeman como técnica de diagnóstico del plasma cromosférico es de utilidad limitada.

Afortunadamente, hay un mecanismo físico de mayor interés para explorar los campos magnéticos de la cromosfera solar: el efecto Hanle (véase [Trujillo Bueno 2001](#)), el cual jugó un papel importante en el desarrollo de la mecánica cuántica al facilitar la introducción

y comprensión del concepto de la superposición coherente de estados puros. En las regiones externas de la atmósfera solar los átomos reciben radiación anisotrópica, cuya absorción y reemisión produce diferencias entre las poblaciones de los subniveles magnéticos de los niveles atómicos y también coherencia cuántica entre ellos. Dicha polarización de los niveles atómicos es transferida al campo de radiación mediante los procesos de emisión y absorción de fotones, generando polarización lineal en las líneas espectrales sin necesidad de un campo magnético. Este es el verdadero origen físico de lo que en inglés se conoce por "scattering line polarization". El efecto Hanle es la modificación de dicha polarización atómica causada por la presencia de un campo magnético y, por lo tanto, modifica la polarización lineal de la radiación emergente. El efecto Hanle opera en el mismo centro de las líneas espectrales y es especialmente sensible a campos magnéticos con intensidades entre  $0.2B_H$  y  $5B_H$ , donde  $B_H$  es la intensidad crítica para la que la separación entre los subniveles magnéticos del nivel superior de la transición iguala a su anchura natural. Por ejemplo,  $B_H = 53$  G para la línea Lyman- $\alpha$  del hidrógeno,  $B_H = 22$  G para la línea  $k$  del Mg II, y  $B_H = 0.000001$  G para la línea del Fe XIII a  $10747 \text{ \AA}$ .

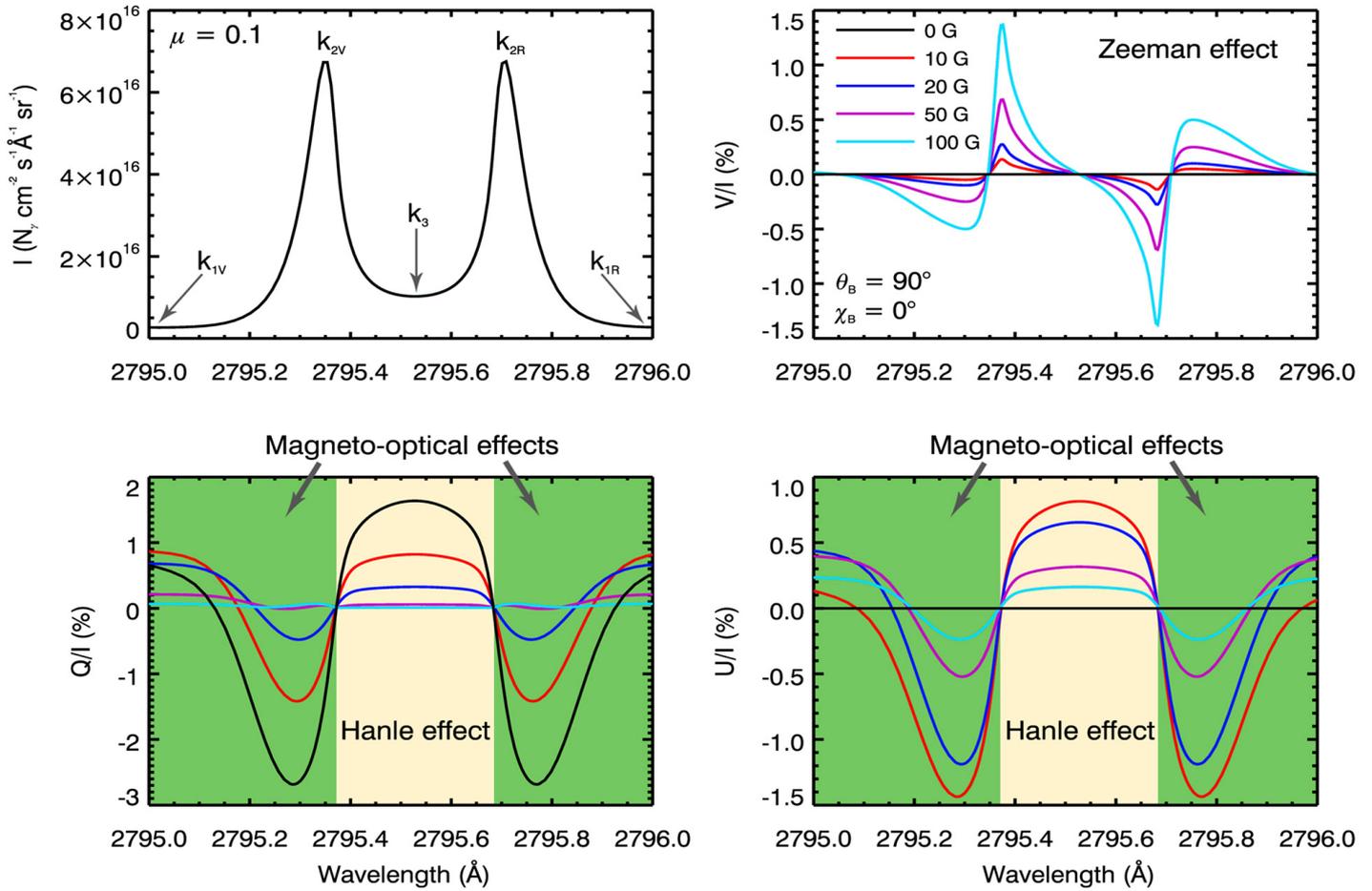


Figura 2: Ejemplo de los perfiles de Stokes I, Q/I, U/I y V/I de la línea k del Mg II debidos a la acción conjunta de los procesos de “scattering” y los efectos Hanle, Zeeman y magneto-ópticos. Los cálculos se han realizado en un modelo semi-empírico de la atmósfera solar incluyendo un campo magnético horizontal, orientado casi hacia el observador, con intensidades entre cero y 100 G. La línea de visión seleccionada está caracterizada por  $\mu=0.1$ , siendo  $\mu$  el coseno del ángulo heliocéntrico, indicando ese valor una posición muy cercana al borde del disco solar. Nótese que la intensidad es insensible al campo magnético y que en su ausencia (curvas en negro) solo tenemos Q/I producido por los procesos de “scattering”. Al aumentar la fuerza del campo magnético ocurre esto: (a) el efecto Zeeman genera polarización circular (V/I) de creciente amplitud, (b) el efecto Hanle modifica la polarización lineal en el *centro de la línea* reduciendo la señal Q/I, y primero aumentando y luego disminuyendo la señal U/I, y (c) los efectos magneto-ópticos modifican la polarización lineal en las *alas de la línea* reduciendo la señal Q/I, y primero aumentando y luego disminuyendo la señal U/I. Las longitudes de onda están dadas en el aire y la dirección de referencia para  $Q>0$  es la tangencial al borde más cercano del disco solar. Para más detalles, véase [Alsina Ballester et al. \(2016\)](#).

Para campos magnéticos con intensidades  $B>5B_H$  entramos en el régimen de saturación del efecto Hanle donde la polarización lineal de la línea espectral considerada solo es sensible a la orientación del campo magnético. Es muy importante notar que  $B_H$  solo depende de cantidades atómicas, en particular es proporcional al coeficiente de Einstein de emisión espontánea correspondiente a la línea espectral en consideración, por lo que su valor es independiente

de la temperatura del plasma en estudio. Además, el efecto Hanle es sensible a la presencia de campos magnéticos enredados, con polaridades mezcladas por debajo de la resolución espacio-temporal de los telescopios actuales, lo que permitió descubrir que las regiones en calma de la fotosfera del Sol almacenan una enorme cantidad de energía magnética debida a la presencia de un campo magnético “oculto” ([Trujillo Bueno et al. 2004](#)).

Por último, hace unos años descubrimos un novedoso mecanismo físico gracias al cual la polarización lineal en las alas de líneas cromosféricas particularmente intensas es sensible a la presencia de campos magnéticos con intensidades similares a las del efecto Hanle. Tal mecanismo resulta de los términos magneto-ópticos que acoplan los parámetros de Stokes Q y U mediante sus ecuaciones de transporte radiativo, los cuales se pensaba que eran insignificantes fuera del plasma fuertemente magnetizado de las manchas solares. Sin embargo, los efectos magneto-ópticos dejan de ser despreciables en las alas de líneas cromosféricas para las que los efectos de correlaciones entre los fotones absorbidos y reemitidos en los procesos de “scattering” son muy importantes, como ocurre con las líneas Lyman- $\alpha$  y Mg II h y k (véase Alsina Ballester et al. 2016, 2019; del Pino Alemán et al. 2016, 2020).

La figura 2 muestra la sensibilidad magnética de los perfiles de Stokes de la línea k del Mg II calculados teniendo en cuenta la acción conjunta de los procesos de “scattering” y los efectos Hanle, Zeeman y magneto-ópticos. Para tal fin, solucionamos numéricamente el problema de la generación y transferencia de radiación polarizada en un modelo semi-empírico de la atmósfera solar en presencia de un campo magnético horizontal orientado casi hacia el observador, teniendo en cuenta los efectos de correlaciones en los eventos de “scattering” en el marco del modelo atómico de dos niveles.

### **PREDICCIONES TEÓRICAS**

El coste de un telescopio espacial es de cientos de millones de Euros, razón por la cual es poco probable que alguna agencia espacial se arriesgue a realizar tal inversión para medir la polarización del espectro UV del Sol sin disponer antes de predicciones teóricas fiables, idealmente confirmadas mediante experimentos espaciales suborbitales.

Tanto la línea Lyman- $\alpha$  del hidrógeno como las líneas h y k del Mg II resultan de dos transiciones entre su correspondiente nivel atómico fundamental, que tiene momento angular  $J=1/2$ , y sus dos niveles superiores con  $J=1/2$  y  $J=3/2$ . En el hidrógeno esas dos transiciones están superpuestas, mientras que las líneas h (nivel superior con  $J=1/2$ ) y k (nivel superior con  $J=3/2$ ) del Mg II están separadas 7 Å. Niveles atómicos con  $J=1/2$  no pueden contribuir a la polarización lineal por “scattering”.

Por lo tanto, la única transición que es sensible al efecto Hanle es la que tiene el nivel superior con  $J=3/2$ , razón por la cual la línea h del Mg II solo es sensible al efecto Zeeman y a los efectos magneto-ópticos.

### **(a) La línea Lyman- $\alpha$ del hidrógeno a 1215,67 Å**

En el año 2011 publicamos los resultados de una primera investigación teórica sobre la polarización lineal en el centro de la línea Lyman- $\alpha$  del hidrógeno, teniendo en cuenta la posible anisotropía del campo de radiación y el efecto Hanle (Trujillo Bueno et al. 2011). Concluimos que, incluso si observásemos con baja resolución espacial y temporal, las amplitudes Q/I y U/I en el centro de la línea serían medibles con la tecnología actual, si bien serían menores que el 1%. Además, mostramos que tales señales de polarización lineal son sensibles a la presencia de campos magnéticos en la base de la corona y a la geometría de su superficie corrugada (Trujillo Bueno et al. 2011, 2012, 2018; Štěpán et al. 2015). Por otra parte, concluimos que la interferencia cuántica entre subniveles magnéticos de los dos niveles superiores de la línea Lyman- $\alpha$  produce en sus alas un aumento muy significativo en las señales de polarización lineal por “scattering” (Belluzzi et al. 2012; véase la figura 3). La extensión de esta investigación al caso de atmósferas estelares con campos magnéticos arbitrarios nos permitió incluir los efectos magneto-ópticos y descubrir que las alas de los perfiles Q/I y U/I de Lyman- $\alpha$  son sensibles a la presencia de campos magnéticos en la cromosfera solar (Alsina Ballester et al. 2019).

### **(b) Las líneas h y k del Mg II alrededor de 2800 Å**

Por otra parte, en el año 2012 mostramos nuestra predicción teórica sobre la variación con la longitud de onda de la polarización lineal producida por procesos de “scattering” en las líneas h y k del Mg II alrededor de 2800 Å (Belluzzi y Trujillo Bueno 2012). Para tal fin, solucionamos el problema de la generación y transferencia de radiación polarizada en modelos semi-empíricos de la atmósfera solar sin incluir campos magnéticos, pero considerando los efectos de correlaciones en los procesos de “scattering” y la interferencia cuántica entre los dos niveles superiores de tales líneas espectrales (es decir, usando un modelo atómico que incluye las dos líneas espectrales). La curva roja en la figura 4 muestra tal predicción suponiendo que no hay campos magnéticos en la atmósfera solar. La presencia de campos magnéticos en su plasma modifica la polarización

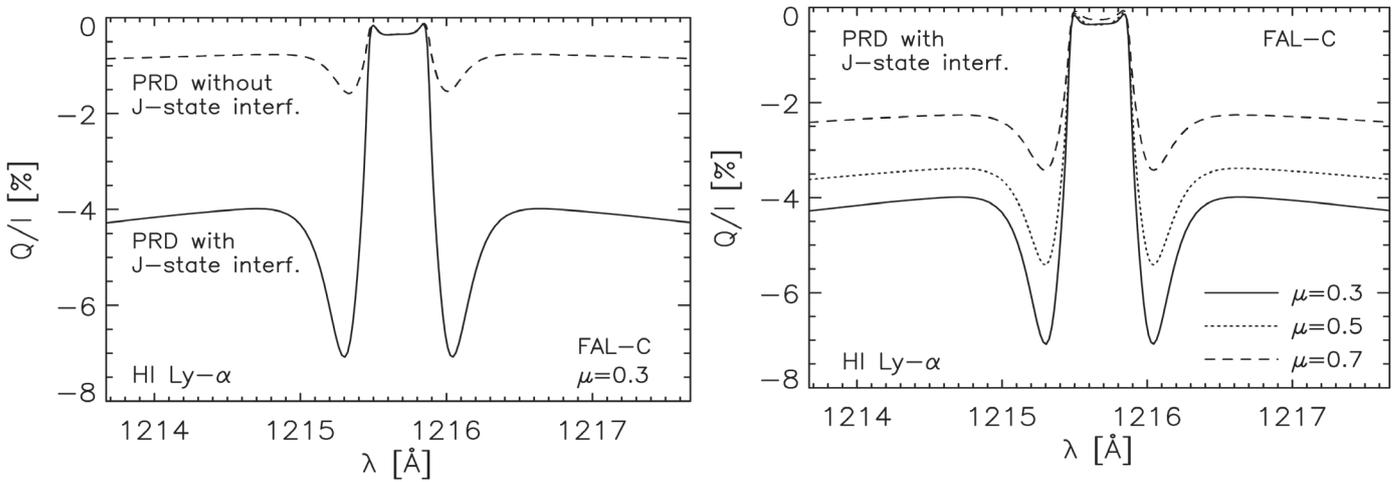


Figura 3: Variación con la longitud de onda del perfil Q/I de Lyman- $\alpha$  calculado en un modelo semi-empírico de la atmósfera solar sin campos magnéticos. Nótese en el panel izquierdo el impacto muy significativo en las alas de la línea causado por la interferencia cuántica entre los subniveles magnéticos pertenecientes a sus dos niveles superiores, los cuales tienen momento angular  $J=1/2$  y  $J=3/2$ . El panel derecho muestra que la amplitud de la polarización lineal en las alas aumenta a medida que la línea de visión se acerca al borde del disco solar ( $\mu$  es el coseno del ángulo heliocéntrico). La dirección de referencia para Stokes  $Q>0$  es la tangencial al borde del disco solar más cercano al punto observado. Para más detalles, véase [Belluzzi et al. \(2012\)](#).

lineal, tanto en el centro de la línea k (efecto Hanle) como en las alas de las líneas h y k mediante los efectos magneto-ópticos (del Pino Alemán et al. 2016, 2020; Alsina Ballester et al. 2016).

Los fotones del centro de las líneas h y k del Mg II provienen de alturas cercanas a la base de la corona (figura 1), mientras que los fotones de sus alas provienen de las capas subyacentes (es decir, de la cromosfera, e incluso de la alta fotosfera). Esto es así porque la opacidad del plasma disminuye a medida que nos alejamos del centro de las líneas espectrales. Por último, en presencia de campos magnéticos con componentes longitudinales superiores a 10 G el efecto Zeeman en ambas líneas espectrales es capaz de inducir perfiles V/I de polarización circular observables (véase la figura 2 para la línea k del Mg II), cuyos lóbulos internos se originan en la alta cromosfera.

**CLASP: EL INSTRUMENTO**

Las investigaciones teóricas que acabamos de resumir motivaron el desarrollo de una serie de experimentos espaciales suborbitales para medir la intensidad

y polarización en tales líneas espectrales, con vistas a confirmar o refutar las predicciones teóricas e intentar obtener información empírica sobre el campo magnético y la geometría del plasma en las regiones externas de la cromosferas solar. Para tal fin, creamos un consorcio internacional liderado por el Marshall Space Flight Center de la NASA, el Observatorio Astronómico Nacional japonés, el Instituto de Astrofísica Espacial francés y el propio Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). Este equipo internacional diseñó el telescopio y el espectro-polarímetro necesarios para medir con alta resolución espectral la intensidad y polarización en líneas del espectro UV del Sol.

Combinando el diseño del instrumento mostrado en la figura 5 y las predicciones teóricas resumidas en la sección anterior preparamos con éxito propuestas competitivas a la NASA para realizar una serie de experimentos espaciales en el marco de su programa para investigaciones con cohetes sonda. El primer experimento (CLASP-1) se realizó el 3 de septiembre de 2015, midiendo durante 289 segundos los perfiles de intensidad (Stokes I) y de polarización lineal

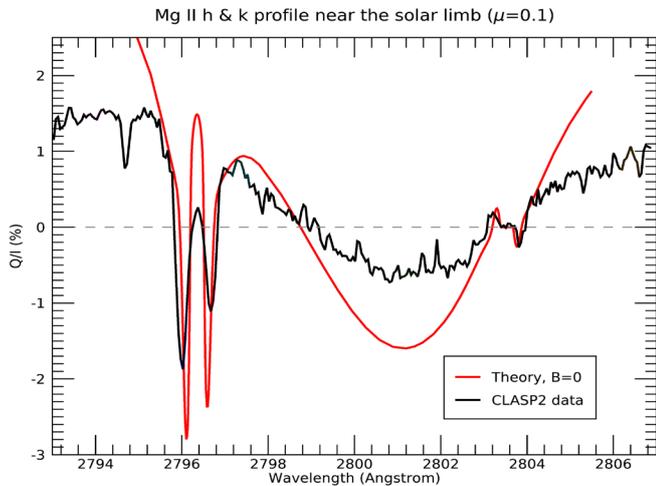


Figura 4: Variación con la longitud de onda del perfil Q/I en la región espectral de las líneas k (2796.4 Å) y h (2803.5 Å) del Mg II. La curva en negro muestra el perfil Q/I medido con CLASP-2 en una región en calma cercana al borde del disco solar (Rachmeler, Trujillo Bueno, McKenzie et al. 2020; en preparación), mientras que la curva en color rojo corresponde al perfil Q/I calculado en un modelo semi-empírico de la atmósfera solar sin campos magnéticos (Belluzzi y Trujillo Bueno 2012). Las longitudes de onda están dadas en el vacío y la dirección de referencia para Stokes  $Q > 0$  es la tangencial al borde del disco solar más cercano al punto observado.

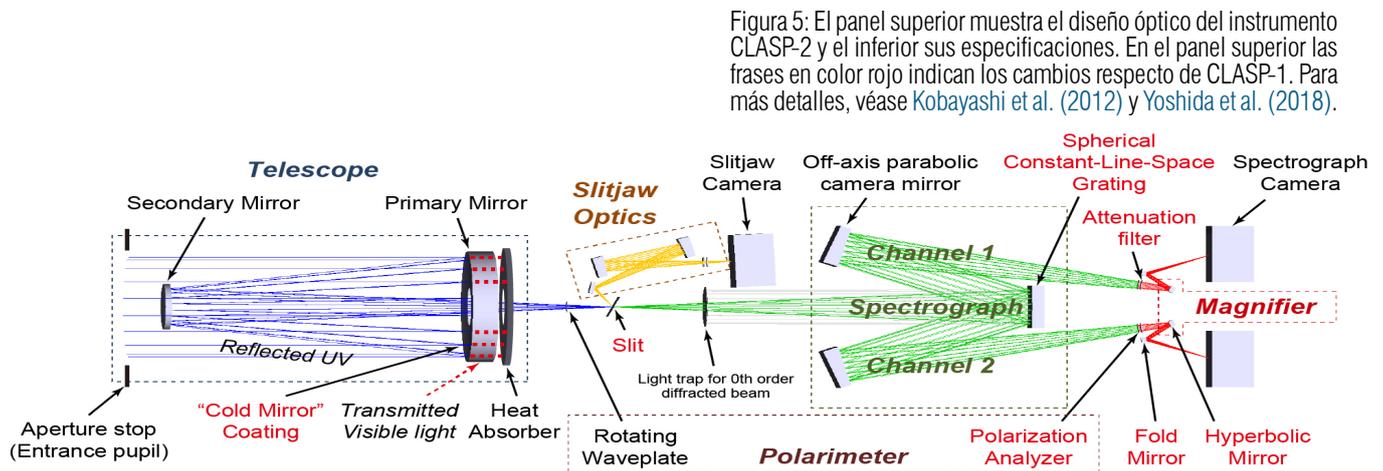


Figura 5: El panel superior muestra el diseño óptico del instrumento CLASP-2 y el inferior sus especificaciones. En el panel superior las frases en color rojo indican los cambios respecto de CLASP-1. Para más detalles, véase Kobayashi et al. (2012) y Yoshida et al. (2018).

Telescope	
Type	Cassegrain
Aperture	ø270 mm
Eff. Focal Length	2614.0 mm (F/9.68)
Primary Mirror	ø300 mm, K=-1, Curvature radius 2054.5 mm
Secondary Mirror	ø123 mm, K=-5.27, Curvature radius 1243.0 mm
Visible Light Rejection	"Cold Mirror" coating on primary mirror

Slit	
Slit Width	7 μm (0.55 arcsec)
Slit Length	2.5 mm (200 arcsec)

Slitjaw Imaging System	
Wavelength	Lyα (band-pass filter)
Optics	- Fold mirror with multilayer coating - Off-axis parabola x 2 - Lyα filter x 2
Detector	512 x 512 CCD, 13μm pixel
Plate Scale	1.03 arcsec / pixel
Resolution	2.9 arcsec (spot RMS diameter)
Magnification	1.00
Field of View	527 arcsec x 527 arcsec

Polarimeter	
Measurements	Stokes I, Q, U, V
Capability	Simultaneous measurement of orthogonal polarizations
Optics	- Rotating waveplate - Polarization analyzer x 2

Spectrograph	
Spectrograph Type	Inverse Wadsworth mounting
Grating Type	Spherical constant-line-space with 1303 mm <sup>-1</sup> groove density
Grating Size	ø106 mm (clear aperture)
Wavelength	Optimized for MgII h & k (280 nm)
Camera Mirror	Off-axis parabola
Resolution	1.1 arcsec (spatial; RMS diameter) 0.01 nm (spectral; RMS diameter)
Magnification	1.87

Spectrograph Cameras	
Detector	512 x 512 CCD, 13μm pixel
Exposure Time	0.2 sec (nominal)
Plate Scale	0.55 arcsec / pixel (spatial) 0.005 nm / pixel (spectral)
Field of View (ROI = 512 x 300 pixel)	200 arcsec (determined by slit) 1.5 nm (to cover 279.45 - 280.35 nm)

(Stokes Q y U) de la línea Lyman- $\alpha$  del hidrógeno en una región en calma del disco solar. El segundo experimento (CLASP-2) fue llevado a cabo el 11 de abril de 2019 para medir los perfiles de Stokes I, Q, U y V en el rango espectral de las líneas h y k del Mg II alrededor de 2800 Å, dedicando 156 segundos a observar una región activa (“plage”) y los 140 segundos finales a observar una región en calma del disco solar.

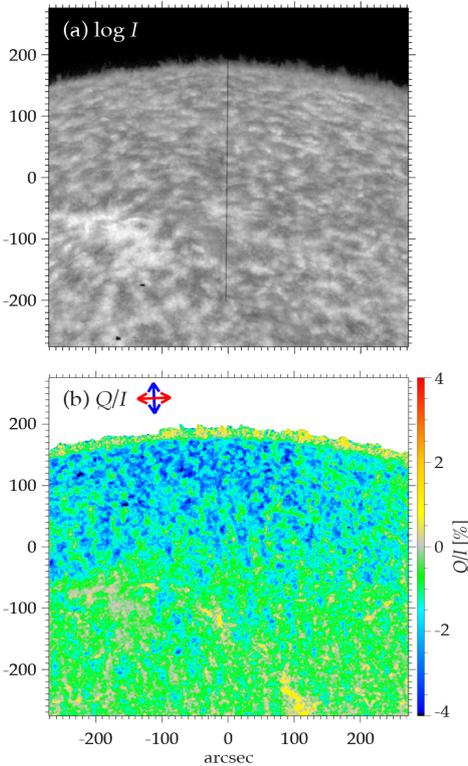
Además del espectro-polarímetro con rendija para medir los perfiles de Stokes con una resolución espectral de 0.1 Å, tanto CLASP-1 como CLASP-2 incluyeron otro instrumento (véase en la figura 5 la parte llamada “slit-jaw optics”) que nos permitió obtener

imágenes de referencia del disco solar. Tal instrumento usa un filtro de banda ancha (con 70 Å de anchura total a media altura) para captar la radiación emitida en toda la línea Lyman- $\alpha$ , proporcionando imágenes en Stokes I, Q/I y U/I. Es decir, además de observaciones espectro-polarimétricas en Lyman- $\alpha$  (CLASP-1) y en las líneas h y k del Mg II (CLASP-2), logramos realizar observaciones filtro-polarimétricas en Lyman- $\alpha$ .

**CLASP: LAS OBSERVACIONES**

La figura 6 muestra las observaciones de Lyman- $\alpha$  obtenidas por CLASP-1 en una región en calma cercana al borde del disco solar, las cuales confirmaron las predicciones teóricas para esta línea espectral.

**A: slit-jaw data**



**B: spectro-polarimeter data**

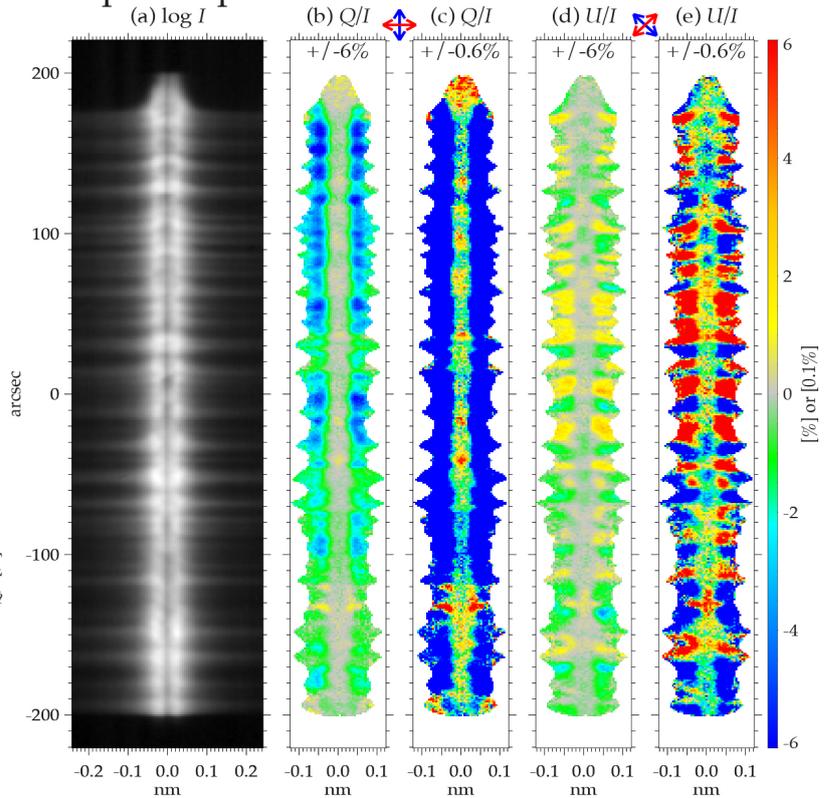


Figura 6: Las observaciones en Lyman- $\alpha$  logradas con CLASP-1 en una región en calma del disco solar. (A) Imágenes obtenidas con el filtro-polarímetro descrito en el texto: (a) I y (b) Q/I. La recta en negro en el panel (a) indica la rendija del espectrógrafo, la cual cubre 400 segundos de arco del disco solar. (B) Variación de los perfiles de Stokes I, Q/I y U/I a lo largo de la dirección espacial de la rendija, medidos con el espectro-polarímetro. Nótese que en los paneles (b) y (d) la escala para Q/I y U/I va desde -6% a +6% (para visualizar las fuertes señales en las alas de la línea), mientras que en (c) y (e) va desde -0.6% a +0.6% (para visualizar las débiles señales en el centro de la línea). Las flechas en color rojo indican las direcciones de referencia para Q > 0 y U > 0. Véase [Kano, Trujillo Bueno, Winebarger et al. \(2017\)](#).

Las señales en las alas de los perfiles Q/I y U/I están por encima del 1% y muestran variabilidad espacial, como consecuencia de la inhomogeneidad del plasma de la cromosfera solar de donde proviene tal radiación. Nótese que los valores de Q/I en las alas de la línea son negativos, con su amplitud aumentando a medida que nos acercamos al borde del disco solar, mientras que los valores de U/I mantienen su amplitud pero su signo fluctúa. Los valores de Q/I y U/I en el centro de la línea, donde opera el efecto Hanle, están por debajo del 1% y su signo fluctúa a lo largo de la dirección espacial indicada por la rendija. Por otra parte, estos datos observacionales sin precedentes mostraron una sorpresa muy interesante:

la amplitud de Q/I en el centro de la línea Lyman- $\alpha$  no muestra la variación centro-borde calculada en varios modelos de la atmósfera solar. La explicación teórica de tal curioso hecho observacional nos ha permitido demostrar que la geometría de la superficie corrugada que delinea la base de la corona es mucho más compleja que la que vemos en los modelos 3D actuales de la atmósfera solar, como el mostrado en la figura 1 (Trujillo Bueno et al. 2018).

La figura 4 incluye un ejemplo del perfil Q/I de las líneas h y k del Mg II observado por CLASP-2 en una región en calma cercana al borde del disco solar (véase la curva en negro). La curva en color

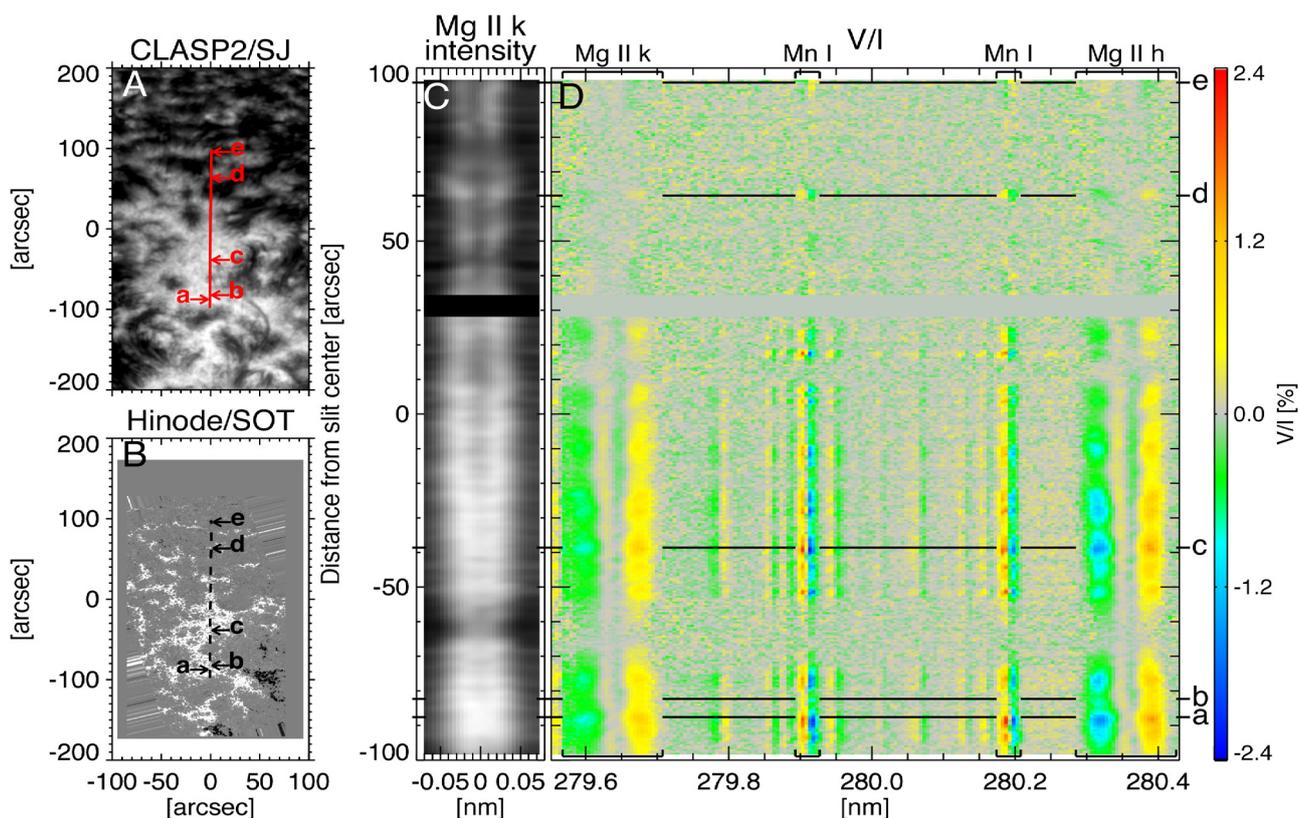


Figura 7: Los paneles izquierdos muestran la región activa (“plage”) observada por CLASP-2, con las rectas en color rojo y a rayas en negro indicando la rendija del espectrógrafo. Los paneles derechos muestran la variación de los perfiles de Stokes I (solo para la línea k del Mg II) y V/I a lo largo de la dirección espacial de la rendija, medidos con el espectro-polarímetro. Nótese que incluso en las posiciones d y e, las cuales corresponden a puntos de la red cromosférica, CLASP-2 detectó la polarización circular producida por el efecto Zeeman en las líneas de Mg II y Mn I indicadas en el panel derecho. Para más detalles, véase Ishikawa, Trujillo Bueno, del Pino Alemán et al. (2020; en prensa).

rojo muestra el perfil teórico calculado en un modelo semi-empírico de la atmósfera solar sin campos magnéticos. El acuerdo en la forma del perfil es excelente, incluso en cuanto concierne al signo y amplitud relativa de los picos situados justo alrededor del centro de las líneas k y h. La diferencia clave se encuentra en la amplitud de la señal para cada longitud de onda, la cual es significativamente mayor en el perfil teórico. Sin embargo, éste fue calculado ignorando a propósito la presencia de campos magnéticos en toda la atmósfera solar. Mediante el efecto Hanle un campo magnético en las capas externas de la cromosfera solar reduce la amplitud de Q/I en el centro de la línea k (véase la figura 2). Por otra parte, los efectos magneto-ópticos inducidos por la acción de los campos magnéticos de la atmósfera solar depolarizan las alas del perfil Q/I (del Pino Alemán et al. 2016, 2020; Alsina Ballester et al. 2016). De esta manera, logramos inferir información sobre el campo magnético en las regiones aparentemente en calma de la atmósfera solar, desde la fotosfera hasta muy cerca de la base de la corona.

CLASP-2 observó además el plasma de una región activa (“plage”), donde la estructura y mayor intensidad de los campos magnéticos hace posible que el efecto Zeeman produzca señales de polarización circular medibles en algunas líneas del espectro UV, tales como las h y k del Mg II y las líneas resonantes del Mn I (véase la figura 7). Por el momento, a partir de estos datos hemos logrado cartografiar la componente longitudinal del campo magnético responsable de los perfiles V/I observados en tales líneas espectrales, para tres alturas en la cromósfera solar (véase Ishikawa et al. 2020; en prensa).

### COMENTARIOS FINALES

Cada uno de tales experimentos espaciales constituye un hito en la astrofísica, pues es la primera vez que se han logrado observar las relativamente débiles señales de polarización producidas por la acción conjunta de los procesos de “scattering” y los efectos Hanle y Zeeman en líneas del espectro UV del Sol. Las observaciones logradas con CLASP-1 y CLASP-2 han confirmado de forma espectacular las predicciones teóricas, lo cual es importante porque valida nuestra teoría cuántica sobre la generación y transferencia de radiación polarizada en líneas resonantes para las que la interferencia mecano-cuántica entre subniveles de distintos niveles atómicos y las correlaciones

en los procesos de “scattering” son relevantes. La confrontación de los perfiles de Stokes observados con los que calculamos en modelos 3D de la cromosfera nos ayuda a identificar los ingredientes físicos claves que faltan por incluir en las simulaciones numéricas de la atmósfera solar. Además, las señales de polarización observadas nos permiten inferir el campo magnético a distintas alturas en la cromosfera solar, tanto en regiones en calma como activas. Todo esto nos anima a seguir desarrollando nuevas técnicas de diagnóstico de plasmas para descifrar el magnetismo y geometría de la atmósfera solar mediante la interpretación de observaciones espectropolarimétricas. Obviamente, observaciones sistemáticas de la intensidad y polarización de la radiación UV del Sol requieren un telescopio espacial equipado con instrumentos como CLASP, pues los cinco minutos de observación de un vuelo suborbital no son suficientes. Estoy convencido que tales telescopios espaciales se harán realidad y que la interpretación física de sus observaciones permitirá entender mejor el complejo magnetismo de las regiones externas de las atmósferas del Sol y de otras estrellas.

### REFERENCIAS:

- Alsina Ballester, E., Belluzzi, L., Trujillo Bueno, J. (2016), The magnetic sensitivity of the Mg II k line to the joint action of Hanle, Zeeman and magneto-optical effects, *ApJ Letters*, 831, L15
- Alsina Ballester, E., Belluzzi, L., Trujillo Bueno, J. (2019), Magnetic sensitivity in the wing scattering polarization signals of the hydrogen Ly- $\alpha$  line of the solar disk radiation, *ApJ*, 888, 85
- Belluzzi, L., Trujillo Bueno, J. (2002), The polarization of the solar Mg II h & k lines, *ApJ Letters*, 750, L11
- Belluzzi, L., Trujillo Bueno, J., Štěpán, J. (2002), The scattering polarization of the Ly- $\alpha$  lines of H I and He II taking into account PRD and J-state Interference effects, *ApJ Letters*, 755, L2
- Carlsson, M., Hansteen, V., Gudiksen, B., et al. (2016), A publicly available simulation of an enhanced network region of the Sun, *A&A*, 585, A4
- del Pino Alemán, T., Casini, R., Manso Sainz, R. (2016), Magnetic diagnostics of the solar chromosphere with the Mg II h & k lines, *ApJ Letters*, 830, L24

- del Pino Alemán, T., Trujillo Bueno, J., Casini, R., Manso Sainz, R. (2020), The magnetic sensitivity of the resonance and subordinate lines of Mg II in the solar chromosphere, *ApJ*, 891, 91
- Ishikawa, R., Trujillo Bueno, J., del Pino Alemán, T., et al. (2020), Mapping solar magnetic fields from the photosphere to the base of the corona, *Science Advances*, in press
- Kano, R., Trujillo Bueno, J., Winebarger, A. (2017), Discovery of scattering polarization in the hydrogen Ly- $\alpha$  line of the solar disk radiation, *ApJ Letters*, 839, L10
- Kobayashi, K., Kano, R., Trujillo Bueno, J., et al. (2012), The Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter: CLASP, *ASP Conf. Series*, 456, 233
- Landi Degl'Innocenti, E., Landolfi, M. (2004), *Polarization in Spectral Lines*, Kluwer Academic Publishers
- Rachmeler, L., Trujillo Bueno, J., McKenzie, D., et al. (2020), Quiet-Sun center-to-limb variation of the linear polarization observed by CLASP-2 across the Mg II h & k lines, *ApJ*, in preparation
- Štěpán, J., Trujillo Bueno, J., Leenaarts, J., Carlsson, M. (2015), Three-dimensional radiative transfer simulations of the scattering polarization of the hydrogen Ly- $\alpha$  line in a magneto-hydrodynamic model of the chromosphere-corona transition region, *ApJ*, 803, 65
- Trujillo Bueno, J. (2001), Atomic polarization and the Hanle effect, *ASP Conf. Series*, 236, 161
- Trujillo Bueno, J., Shchukina, N., Asensio Ramos, A. (2004), A substantial amount of hidden magnetic energy in the quiet Sun, *Nature*, 430, 15
- Trujillo Bueno, J., Štěpán, J., Casini, R. (2011), The Hanle effect of the hydrogen Ly- $\alpha$  line for probing the magnetism of the solar transition region, *ApJ Letters*, 738, L11
- Trujillo Bueno, J., Štěpán, J., Belluzzi, L. (2012), The Ly- $\alpha$  lines of H I and He II: a differential Hanle effect for exploring the magnetism of the solar transition region, *ApJ Letters*, 746, L9
- Trujillo Bueno, J., Štěpán, J., Belluzzi, L., et al. (2018), CLASP constraints on the magnetization and geometrical complexity of the chromosphere-corona transition region, *ApJ Letters*, 866, L15
- Yoshida, M., Song, D., Ishikawa, R., et al. (2018), Wavefront error measurements and alignment of the CLASP-2 telescope, *Proceedings of the SPIE*, Vol. 10699, id. 1069930

Figura 8: Algunos miembros del equipo CLASP-1 horas antes de su lanzamiento.



# LA PRIMERA EXPERIENCIA VIRTUAL DE LA SEA

A causa del COVID-19, el pasado 27 de marzo de 2020 se decidió cancelar la Reunión Científica de la SEA, prevista para julio de 2020 y aplazarla. Pero para no dejar a nuestro colectivo sin reunión científica se optó por organizar un encuentro virtual, la XIV.0 Reunión Científica de la SEA 2020



**Benjamín Montesinos**  
Vicepresidente de la SEA y  
coordinador de la Comisión Científica  
Departamento de Astrofísica,  
Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA)  
[bmm@cab.inta-csic.es](mailto:bmm@cab.inta-csic.es)

## REBOBINANDO

Para empezar, un poco de historia.

El 11 de julio de 2019 recibisteis a través de la lista de correos sea-anuncios la 'Circular 0' con información sobre la puesta en marcha de la XIV Reunión Científica de la SEA, que tendría lugar justo un año después en La Laguna, del 13 al 17 de julio. El segundo párrafo de la Circular decía: *"Es la segunda vez que la Reunión Científica de la SEA se organiza en Tenerife. En 1998 se celebró en la isla la III Reunión Científica: el Hubble Deep Field acababa de ser observado, el censo de planetas extrasolares no llegaba a la docena, y se comenzaba a comprender la naturaleza de las explosiones cósmicas de rayos gamma... ¡mucho se ha avanzado en estas dos décadas!"*. (¡...y tanto!).

A finales de diciembre de 2019 la prensa comenzó a informar acerca de la aparición de un virus en la región alrededor de Wuhan; un mes después se detectó el primer caso de contagio en España, y a partir de ahí la –triste- historia es bien conocida.

El 27 de marzo de 2020 los Comités Científico y Local, y la Junta Directiva de la SEA, tomamos la decisión de cancelar la Reunión y aplazarla, en principio, hasta 2021. Este paso se dio cuando se avecinaban los días más duros del primer estado de alarma.

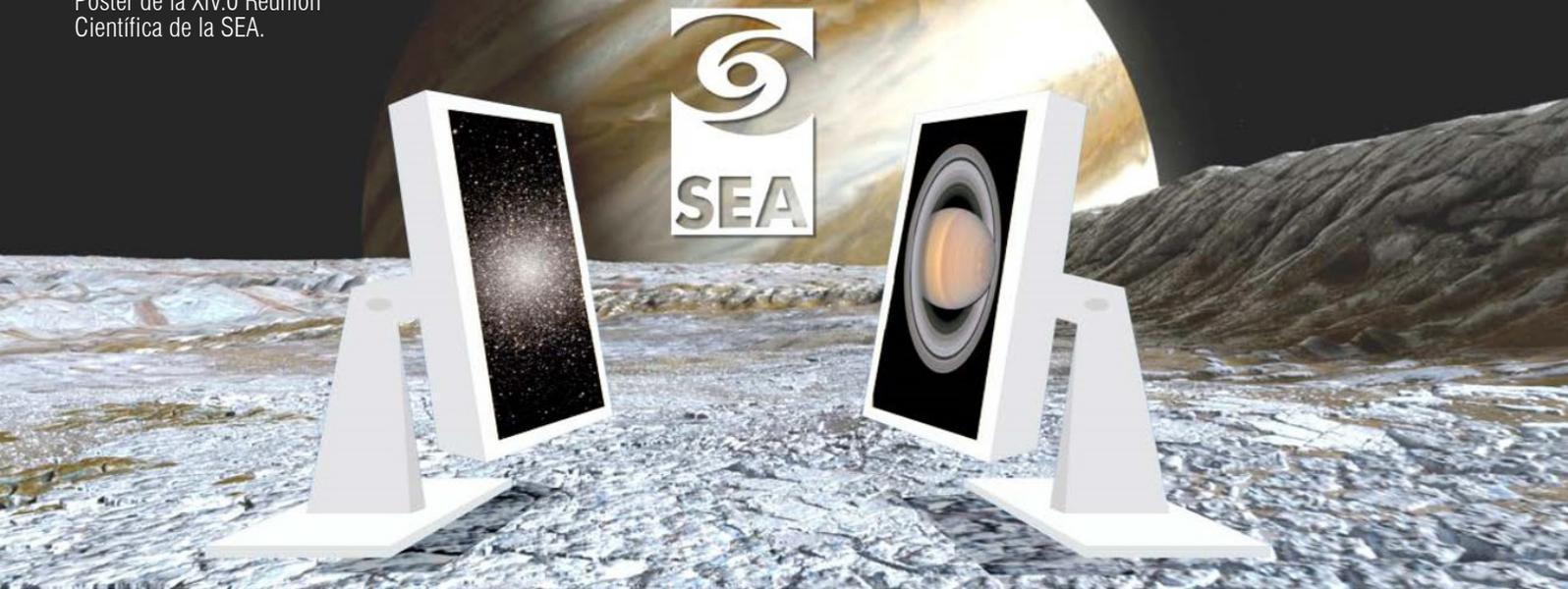
Confianto en que unos pocos meses después la situación, si no óptima, habría mejorado, pensamos que ante el desánimo general, no podíamos dejar a nuestro colectivo sin Reunión Científica. *"Esta decisión va acompañada de un conjunto de alternativas viables, enfocadas a mantener viva la dinámica de contactos y actividades colectivas de la SEA. Queremos contribuir con nuestro esfuerzo a volver a la normalidad, y la ciencia puede y debe tener un papel importante en este empeño"*, estas frases, como declaración de intenciones, figuraban en ese correo electrónico que recibisteis a finales de marzo.

Desde ese momento, procedimos a desmontar la reunión presencial y, por primera vez, y sin experiencia previa, a organizar un encuentro virtual. Así nació la XIV.0 Reunión Científica de la SEA 2020.

# XIV.º Reunión Científica

## 13-15 de JULIO de 2020

Póster de la XIV.º Reunión Científica de la SEA.



### ¿CÓMO ORGANIZAR UN ENCUENTRO VIRTUAL?

Casi coincidiendo en el tiempo con nuestro anuncio de cancelación, la European Astronomical Society hizo lo propio con su congreso presencial que debería celebrarse en Leiden y trasladó en bloque todas las sesiones al formato virtual. En nuestro caso, no podíamos plantearnos nada semejante: no contábamos con los medios humanos ni técnicos para abordar, con tan solo tres meses y medio de antelación, una tarea tan descomunal, y pensamos además que sería complicado mantener la atención de los asistentes ante una pantalla de ordenador durante cinco días en sesiones intensas de mañana y tarde. Las reuniones científicas de la SEA, en su formato presencial tradicional, son eventos con programas muy densos... trasladarlos a un formato virtual era algo que descartamos de entrada.

En pocas semanas el Comité Científico y la Junta Directiva pulimos un [programa de tan solo tres días \(13 al 15 de julio\)](#). Contando con la comprensión de los más de 30 ponentes que habían sido contactados y confirmados para impartir charlas en las sesiones plenarias, centramos la parte científica de la Reunión en nueve charlas muy cortas (15 minutos) que titulamos genéricamente “[Hitos y Retos](#)” (HR), seis sesiones monográficas designadas como “[Resumen de Contribuciones](#)” (RC) dedicadas a resumir y debatir las 271 contribuciones enviadas a las tradicionales secciones en que dividimos las sesiones paralelas de las Reuniones: [Galaxias y Cosmología](#), [Vía Láctea y sus](#)

[componentes](#), [Física solar](#), [Ciencias planetarias](#), [Instrumentación y supercomputación](#) y [Enseñanza y divulgación](#), y por supuesto las charlas de los [premios SEA Tesis](#). Los archivos pdf de las contribuciones a las sesiones RC se encuentran [indexados](#) en el servicio ADS de NASA.

El programa incluyó una mesa redonda sobre [política científica](#), charlas de los [grupos de trabajo y comisiones](#), una sesión de [divulgación](#), un animado [café-tertulia](#) sobre perspectivas profesionales, la [Asamblea General](#) de la SEA y tres [reuniones de grupos](#).

Dos charlas de divulgación impartidas por José Alberto Rubiño y Nanda Rea a través del canal [YouTube de la SEA](#), completaron el programa. Un [foro SEA café](#) y un canal slack permitieron la comunicación entre los participantes y la programación de eventos fuera del propio programa “oficial”.

El Comité Local se transformó en un Comité Técnico, formado fundamentalmente por compañeros del IAC, encargado de la puesta a punto y gestión de todas las herramientas y plataformas necesarias para llevar la Reunión a la pantalla de cada participante.

### BALANCE

La lista de 757 participantes inscritos hasta el comienzo de la Reunión –decidimos no poner ninguna cuota de inscripción– fue un motivo suficiente para estar satisfechos de haber compuesto un programa

atractivo, y a la vez una responsabilidad para que todo funcionara de la forma más fluida posible. La asistencia a cada una de las sesiones fue excelente, superándose por ejemplo las 300 conexiones a la mesa redonda, y las 200 a las charlas HR.

Hubo, cómo no, algún imprevisto, en concreto un apagón en toda la isla de Tenerife el miércoles día 15 por la mañana, que obviamente afectó a nuestros compañeros del IAC y de la ULL, y obviamente al Comité Técnico, que afortunadamente contaba con miembros en la península. Ese apagón nos habría impactado de una forma más notoria si la Reunión se hubiese celebrado de forma presencial en La Laguna, porque, sin electricidad en las salas, nos habría obligado a cancelar las sesiones; sin embargo, aunque con algún contratiempo, pudimos ir adelante esa mañana con el programa previsto.

En cuanto a resultados concretos destacables, es complicado en un artículo tan corto señalar algunos sin hacer de menos a otros, de modo que voy a jugar con ventaja y a aprovechar una de las iniciativas de divulgación de la SEA, que de paso, os recuerdo: la colaboración bianual de la Sociedad con la revista de divulgación astronómica [ASTRONOMÍA](#). En los números de abril y octubre de cada año, la revista publica un artículo proporcionado por la SEA. En el número de octubre, Martin Pawley, de la Agrupación Astronómica Coruñesa lo, escribió una entusiasta [contribución](#) donde describe en detalle hitos y resultados de la Reunión; os animo a leerlo porque merece la pena, máxime cuando procede de una persona que no es astrónomo profesional, pero que nos sigue con pasión y nos ha bridando más de una vez la posibilidad de acercar la Astronomía al público más cercano a él a través de su sección astronómica semanal "[A noite é necesaria](#)" en Radiovoz de Galicia.

### EL FUTURO

Cuando leáis este Boletín os habrá llegado la noticia de que hemos cambiado nuestra intención de organizar la XIV Reunión de forma presencial en La Laguna en 2021. El objetivo, a día de hoy, es celebrarla en la *primera semana de septiembre de 2022*. Esta decisión fue tomada de forma conjunta por la Junta Directiva de la SEA y los responsables de las organizaciones locales de la XIV Reunión (2020, La Laguna,

aplazada) y de la XV Reunión (prevista inicialmente para 2022 en Granada). El cambio del mes para la Reunión, que tradicionalmente es julio, está motivado porque a finales de junio 2022 está prevista la celebración en Valencia de la conferencia de la EAS, de modo que una Reunión Científica un par de semanas después no parecía lo más conveniente.

Hemos oído estos meses machaconamente que los encuentros virtuales "han llegado para quedarse". En el caso de las reuniones científicas de la SEA no queremos prescindir de la presencialidad, ya que son las únicas ocasiones en que comunidades de astrónomos de diversas especialidades pueden encontrarse y cambiar impresiones, y en particular creemos que es fundamental que los estudiantes y miembros júnior de la SEA puedan conocer personalmente a compañeros suyos y a investigadores más *senior*, y salir del útil, pero frío mundo de las videoconferencias.

De cualquier modo, será inevitable a partir de ahora, que las reuniones científicas tengan un carácter mixto, presencial, y virtual; esto último dará opción de participar a investigadores que por razones de financiación, conciliación, calendario u otros motivos no puedan viajar al lugar de encuentro.

### AGRADECIMIENTO

Visto el programa de forma global y el desarrollo de la Reunión, creo que no es caer en la autocomplacencia si afirmo que podemos estar muy contentos del resultado final: los temas científicos fueron punteros y se trataron de forma ágil pero profunda, las discusiones en las sesiones RC fueron animadas, los contenidos de todas las sesiones, muy variados y la participación muy alta.

Tal y como hice en la breve ceremonia de clausura, quiero agradecer a los ponentes, moderadores, participantes en la mesa redonda, coordinadores de sesiones y coordinadores técnicos -en total más de 80 personas- su presencia activa y su esfuerzo desinteresado, a todos los inscritos, su interés, y a los Comités Científico, Local, y Técnico, y a la Junta Directiva de la SEA su implicación e impecable labor.

Ojalá todo vaya bien y podamos vernos en La Laguna en 2022.

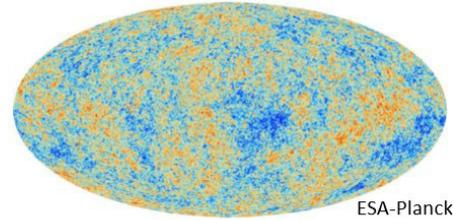
## CONFERENCIAS PÚBLICAS DE DIVULGACIÓN

 YouTube [www.youtube.com/SEAstronomia](http://www.youtube.com/SEAstronomia)



Lunes, 13 de julio, 19:30

**El Fondo Cósmico de Microondas:  
Desvelando el origen del Universo**  
José Alberto Rubiño (IAC, Tenerife)



ESA-Planck



Martes, 14 de julio, 19:30

**Viajando entre los monstruos  
magnéticos y gravitatorios  
de nuestra Galaxia**  
Nanda Rea (ICE, CSIC e IEEC, Barcelona)



@wallhere  
XIV.0 Reunión Científica

Sociedad Española de Astronomía

13-15 julio 2020

Anuncio de las conferencias de divulgación para el público en general.

Captura de pantalla al inicio de la sesión de divulgación.

**Tertulias (virtuales)**

**A falta de esas tertulias a la salida de la sala .....**

The screenshot shows a virtual meeting grid with 12 participants. The participants are: Natalia Ruiz Zelmanovitch, Manuel González García, Emilio García, Mirjana Povic, Benjamín Montesinos, Carmen Del Puerto, Javier Armentia, Albert Domingo, anna boluda, Jaume Jaume Bestard, and Lola Balaguer. A large white 'L' is visible in the bottom right corner of the grid.

# NUEVO NOBEL PARA LA ASTROFÍSICA

Los agujeros negros siguen en la cresta de la ola y, en gran medida gracias a ellos, la astrofísica se mantiene en el centro de la actualidad científica. No es extraño que estos objetos, los más fascinantes del universo, traspasen las fronteras de la astrofísica, pues sus asombrosas propiedades permiten realizar los tests más exigentes que podamos imaginar a la relatividad general. Los agujeros negros captan pues la atención de un gran abanico de personas, desde los físicos más fundamentales hasta los filósofos de la naturaleza, pasando por todos los que sienten curiosidad por los prodigios de nuestro mundo.



**Rafael Bachiller**  
Director del Observatorio  
Astronómico Nacional (OAN, IGN)  
*r.bachiller@oan.es*

En 2017, mientras la Fundación Nobel premiaba la detección de ondas gravitacionales que delatan las colisiones de agujeros negros de masas estelares, el Event Horizon Telescope (EHT) realizaba las observaciones revolucionarias que conducirían a la primera imagen de la proximidad del agujero negro supermasivo en Messier 87. Y no habíamos terminado de celebrar estos resultados, que se hicieron públicos en abril de 2019, cuando recibimos la noticia de que el Nobel de Física 2020 ha sido otorgado a Reinhard Genzel, Andrea Ghez y Roger Penrose por sus descubrimientos sobre estos objetos que a todos nos apasionan.

## VIRTUOSISMO OBSERVACIONAL

Genzel y Ghez han sido distinguidos con la mitad del premio por “el descubrimiento de un objeto compacto supermasivo en el centro de la Vía Láctea”. Reinhard Genzel (MPE, Múnich) y Andrea Ghez (UCLA, Los Ángeles) han estado monitorizando los movimientos de las estrellas próximas a SgrA\* durante casi tres décadas. El grupo de Genzel viene utilizando los telescopios de ESO en Chile, mientras que el de Ghez ha realizado sus observaciones con los telescopios Keck en Hawái.

Todos sabemos las dificultades que existen para penetrar en las regiones centrales de la Galaxia y observar las estrellas individuales que allí se encuentran. Las densidades columnares de polvo son tan descomunales en esa dirección que, de cada mil millones de fotones que son emitidos por una estrella en esa zona, tan solo uno de ellos llega a nuestros telescopios. Por eso ambos equipos trabajaron en el infrarrojo cercano (en torno a 2 micras de longitud de onda), donde la extinción visual es un orden de magnitud menor que en el óptico.

Pero la extinción interestelar no es el único problema para observar estrellas individuales cerca del centro galáctico, la turbulencia en la atmósfera terrestre limita la resolución angular incluso en los telescopios mayores situados en tierra y, por ello, ambos equipos contribuyeron, en los primeros tiempos, a desarrollar la técnica de *speckle* en el infrarrojo.

Para los astrónomos más jóvenes, recordaré que esta técnica de ‘alineal-y-sumar’ consiste en tomar exposiciones individuales de una décima de segundo de duración, alinear las imágenes espacialmente y

combinar todas ellas. Al realizarse con tiempos de exposición tan cortos, las imágenes *speckle* están limitadas a estrellas relativamente brillantes. Genzel la aplicó inicialmente en el telescopio NTT de La Silla (que tiene un espejo de 3,6 metros de diámetro) en los años 1990, pero necesitaba observar estrellas más débiles y con mejor resolución angular.

Las limitaciones del *speckle* pudieron ser superadas con las técnicas de óptica adaptativa que fueron desarrolladas en el último tercio del siglo pasado y que fueron empleadas por los equipos de Genzel (en los VLT) y Ghez (en los Keck) a principios de los 2000. La utilización de una estrella artificial (un láser que excita el sodio de la alta atmósfera) y un espejo secundario deformable permite, realizando iteraciones en bucle, compensar las aberraciones en tiempo real y lograr largos tiempos de exposición. Se pueden obtener así los espectros de las débiles estrellas infrarrojas.

En concreto, Genzel estuvo usando, en el VLT, el instrumento NACO para las imágenes y SINFONI para la espectroscopía, detectando así el movimiento orbital de varias estrellas en torno al centro galáctico. Pronto se hizo famosa entre los astrónomos la estrella etiquetada como S2 por Genzel (SO-2 por Ghez) que, de acuerdo con sus observaciones, describía un recorrido vertiginoso. Su órbita, altamente excéntrica ( $e = 0,88$ ) tiene un periodo de... ¡apenas 16 años! Cuando pasa por el periastró (como hizo en los años 2002 y 2018), esta estrella se encuentra a tan solo 17 horas luz de SgrA\*.

Después de un seguimiento de unas dos décadas, ya se había observado más de una órbita completa y las observaciones de los VLT y de los Keck estaban en un acuerdo magnífico. A partir de estos datos, se determinó la masa del objeto central: 4 millones de masas solares. Mediante observaciones radio, el tamaño de SgrA\* estaba estimado a menos de una unidad astronómica y su movimiento propio era indetectable. Emanando de SgrA\* también se conocían erupciones en rayos X y en el infrarrojo.

Todo sumado, la conclusión que se impuso es que SgrA\* es un agujero negro de 4 millones de masas solares (Ghez et al. 2008, *Ap. J.* 689, 1044; Genzel et al. 2010, *Rev. Mod. Phys.* 82, 3121). Las erupciones observadas encajan muy bien en esta

interpretación ya que deben de ser debidas a variaciones en la acreción sobre el agujero negro (Genzel et al. 2003, *Nature* 425, 6961).

Genzel impulsó el diseño y construcción del instrumento GRAVITY para el VLTI, que vio su primera luz en 2015. Con 20 microsegundos de arco de resolución, este instrumento nos está revelando detalles exquisitos de la región central de la Vía Láctea. El movimiento de la estrella S2 puede ser ahora detectado de noche a noche y, gracias a la gran masa del objeto central, los efectos relativistas, como la precesión del periastró o el desplazamiento hacia el rojo debido a la gravitación, se manifiestan patentemente. Otras observaciones espectaculares son las de las erupciones, que provienen de fuentes que orbitan a tan solo unos 4 radios de Schwarzschild del agujero negro, es decir, justo en las regiones de la órbita estable más interna.

En resumen, el trabajo de Genzel y Ghez ilustra maravillosamente el virtuosismo alcanzado por las observaciones astronómicas de nuestros días. Óptica adaptativa, interferometría, detectores de bajísimo ruido cuántico, las técnicas más innovadoras han sido puestas al servicio de estas imágenes y medidas que nos dejan asombrados por muy astrónomos profesionales que seamos.

Pero, además, detrás de la tecnología hay unas personas absolutamente sobresalientes. Asistimos a una conferencia online de Andrea Ghez organizada por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC) el pasado 29 de octubre y pudimos apreciar desde primera línea su carisma y su dimensión humana. Después de Marie Curie, Maria Goepper Mayer y Donna Strickland, Ghez es la cuarta mujer en recibir este galardón en una disciplina científica, la física, que presenta una de las brechas de género más profundas (los otros 212 laureados hasta ahora han sido hombres).

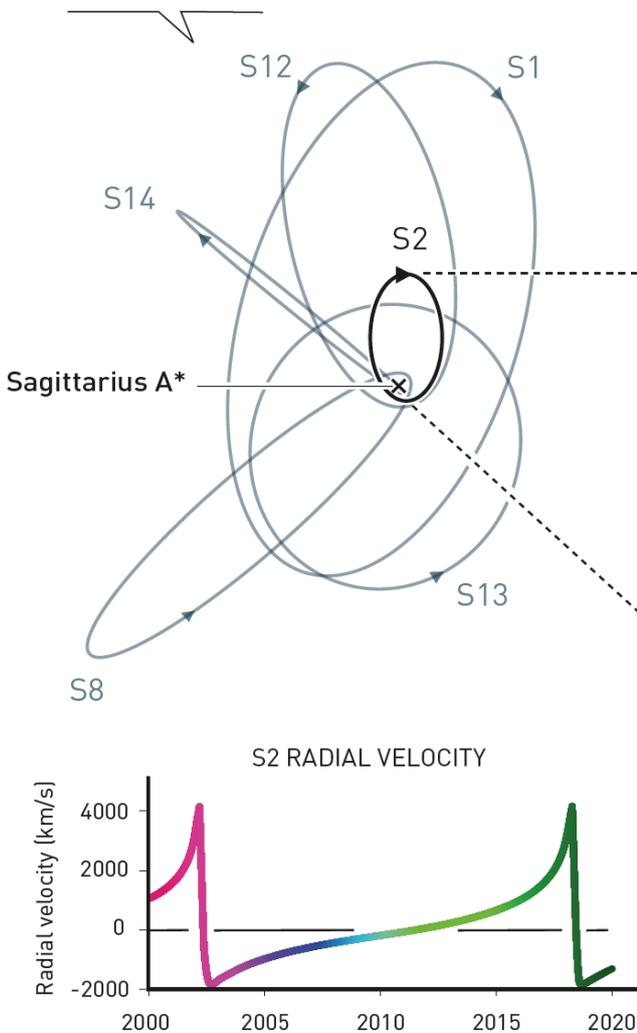
Yo he tenido la suerte de coincidir con Reinhard Genzel en varias tareas de gestión o de asesoramiento científico. Su personalidad es arrolladora, su entusiasmo y su optimismo contagiosos. Es buen conocedor de la astronomía española y académico correspondiente de nuestra Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Hemos tenido la ocasión de escuchar algunas sus conferencias en España (por

# Stars closest to the centre of the Milky Way

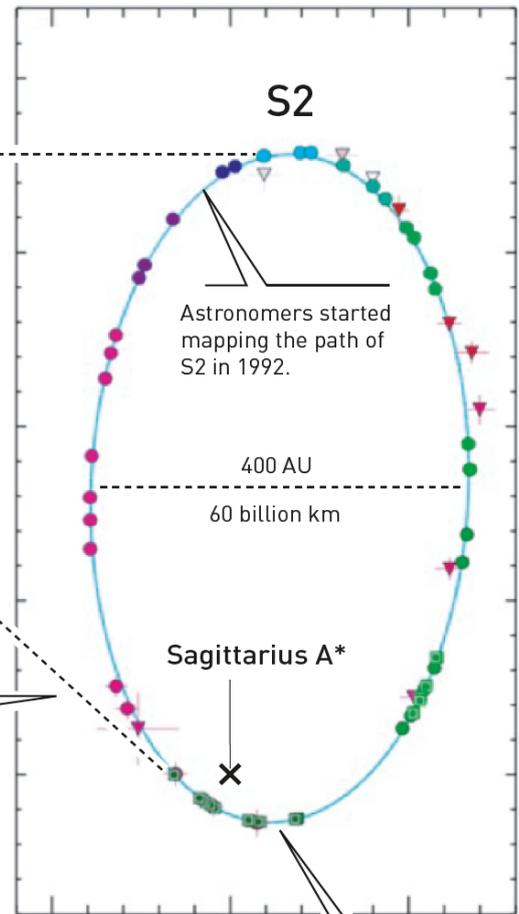
Datos orbitales de las estrellas más cercanas al agujero negro en el centro de la Vía Láctea. Créditos: The Royal Swedish Academy of Sciences.

The stars' orbits are the most convincing evidence yet that a supermassive black hole is hiding in Sagittarius A\*. This black hole is estimated to weigh about 4 million solar masses, squeezed into a region no bigger than our solar system.

Some of the measured orbits of stars close to Sagittarius A\* at the centre of the Milky Way.



Astronomers were able to map an entire orbit of less than 16 years for one of the stars, S2 (or S-02). The closest it came to Sagittarius A\* was about 17 light hours (more than 10,000 million kilometres).



The S2 star's radial velocity increases as it approaches Sagittarius A\* and decreases as it moves away along its elliptical orbit. Radial velocity is the component of the star's velocity that is in our line of sight.

Closest to Sagittarius A\* (in 2002 and 2018), S2 reaches its maximum velocity of 7 000 km/s.

ejemplo, la multitudinaria que impartió en la Fundación BBVA, cuando fue presentado por Santiago García Burillo, del OAN). Sus opiniones han sido determinantes para mantener los observatorios del IRAM (el de Pico Veleta y el de Plateau de Bure) con la instrumentación más puntera del mundo durante décadas.

## GENIO HETERODOXO

La otra mitad del Nobel de Física 2020 se ha otorgado a Penrose “por el descubrimiento de que la formación de agujeros negros es una predicción robusta de la teoría de la relatividad general”.

Para comprender la aportación de Penrose que ha motivado este premio, hay que remontarse a un trabajo de Oppenheimer y Snyder del año 1939 (*Phys. Rev.* 56, 455) en el que se demostraba que el colapso de una nube perfectamente esférica de materia, bajo la métrica de Schwarzschild, conducía a la formación de una singularidad rodeada por un horizonte que hacía de frontera. Los mismísimos Einstein y Wheeler expresaron dudas sobre si este tipo de colapso podría suceder en el mundo real o si la falta de simetría perfecta, la emisión de ondas gravitacionales, la rotación, o algún otro fenómeno podría evitar la formación de esa estructura compacta, un agujero negro.

Mientras el debate se alargaba, el rápido desarrollo de la radioastronomía tras la Segunda Guerra Mundial condujo a la identificación de unas misteriosas fuentes de ondas de radio que, en el óptico, parecían estrellas muy débiles. En 1963, el astrónomo holandés-estadounidense Marteen Schmidt (*Nature* 197, 4872) estimó la distancia y luminosidad de algunas de estas radiofuentes y concluyó que se trataba de galaxias situadas en los confines del universo. El primer cuásar identificado, 3C273, presentaba un desplazamiento hacia el rojo de  $z=0,158$ , lo que indicaba una distancia de 760 Mpc. Su luminosidad era miles de veces mayor que la de la Vía Láctea.

Cuando la naturaleza extragaláctica de los cuásares estaba totalmente aceptada, ya en 1963, Wheeler comentó con Penrose, entonces un joven y brillante matemático (había nacido en Essex en 1931), los cálculos de Oppenheimer y Snyder sobre el colapso gravitatorio. Penrose se puso a analizar el problema tratando de eliminar la hipótesis de la simetría esférica. Para ello desarrolló nuevos mé-

todos matemáticos e introdujo el concepto de ‘superficie atrapada’ (*trapped surface*) para describir al agujero negro por debajo de horizonte. Pronto llegó a la conclusión de que tales superficies atrapadas se formaban también durante el colapso de objetos rotantes (para formar los agujeros negros en rotación que ya había descrito Kerr), y que lo hacían de manera independiente a la geometría del cuerpo que colapsa. Una vez que se forma una superficie atrapada, el colapso ya es imparable. Es decir, Penrose demostró que la formación de un agujero negro era una predicción robusta (e inevitable) de la relatividad general de Einstein (Penrose 1963, *Phys. Rev. Let.* 10, 66; 1965, *Phys. Rev. Let.* 14, 57).

Gracias a su fuerte formación en matemáticas, Penrose pudo dar un grandísimo impulso al estudio de la gravitación. Introdujo numerosas innovaciones para visualizar el espacio-tiempo, como las transformaciones conformes, los twistores y los gráficos que hoy son conocidos como ‘diagramas de Penrose’.

El trabajo de Penrose llevó a aceptar ampliamente que los cuásares deben albergar un agujero negro supermasivo en su núcleo, y que su potente radiación podía estar causada por los fenómenos de acreción sobre el objeto compacto. Lynden-Bell acabaría sugiriendo, en 1969 (*Nature* 223, 5207), que muchas galaxias (si no todas) deben poseer un agujero negro central.

Junto a Hawking, Penrose demostró que estos resultados sobre agujeros negros pueden extenderse al estudio de singularidades cosmológicas, como la del big bang. De hecho, los trabajos con Hawking aportaron mucha más información sobre el comportamiento de tan fascinantes objetos (p. ej.: Hawking & Penrose 1970, *Proc. of the Royal Society*, 314, 1519). Y creo que es legítimo preguntarse si no habría sido más adecuado haber concedido este Nobel hace unos diez o veinte años, cuando la importancia de estas aportaciones ya estaba completamente reconocida y, además, Hawking aún vivía. Si hubiese sido así, Hawking habría podido compartir justamente el premio (los Nobel no se otorgan a título póstumo).

Penrose está teniendo una carrera muy larga y fructífera. En sus publicaciones no se ha limitado a artículos científicos, además ha escrito unos libros muy

influyentes que han abordado grandes cuestiones de la filosofía de la ciencia. Muchos de nosotros recordaremos “La nueva mente del emperador” (1989) en el que Penrose argumenta que la mecánica cuántica determina el funcionamiento del cerebro y que la conciencia humana no solo está compuesta de algoritmos y, por lo tanto, nunca podrá ser simulada por una máquina.

En 2004 publicó una obra monumental: “El camino a la realidad”, un volumen de 1100 páginas que trata de abarcar todos los aspectos del modelo estándar de la física y que aporta su visión personal sobre la unificación de la relatividad general y la mecánica cuántica. No es un libro de lectura fácil.

Más recientemente, Penrose, junto con el físico armenio Vahe Gurzadyan, ha desarrollado la cosmología cíclica conforme (CCC), una teoría heterodoxa que niega la inflación y que pretende demostrar que el universo evoluciona mediante ciclos infinitos. En apoyo de esta teoría, los dos físicos argumentan que, en los mapas de la radiación cósmica de fondo (por ejemplo, los obtenidos por el satélite Planck), pueden reconocerse indicios del universo que precedió al big bang del universo actual. La teoría ha sido recogida en el libro del 2010 “Ciclos del tiempo. Una extraordinaria nueva visión del universo”.

En un plano más personal, me gustaría comentar que siempre me ha fascinado la descomunal figura de Penrose, también su dimensión humanista. Sus reflexiones sobre cuestiones filosóficas que a todos nos interesan rezuman honestidad. Se pregunta el físico, por ejemplo, si el universo puede tener un propósito, o si es un sistema que se limita a funcionar como un gran ordenador en el que el ser humano ha aparecido por algún tipo de casualidad. Penrose intuye que debe de haber algo más profundo en todo esto, pero reconoce que tan solo es una intuición (él se declara ateo).

### **EDAD DE ORO**

El Nobel de este año reconoce la importancia de los agujeros negros en la descripción de la gravedad. Su estudio y sus observaciones han abierto una era completamente nueva tanto en la astronomía como en la física. Los observatorios de ondas gravitacionales no dejan de sorprendernos cada día con

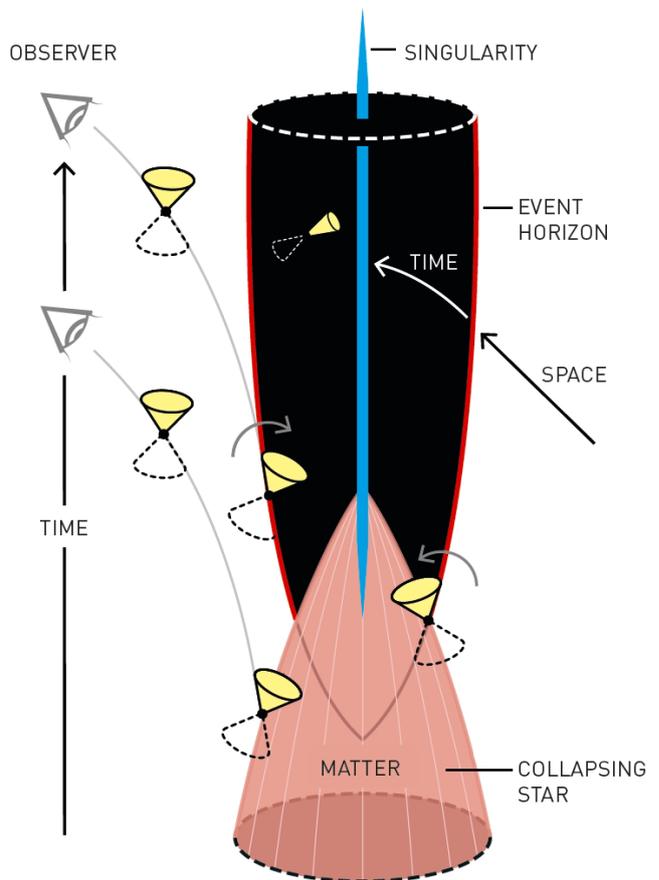
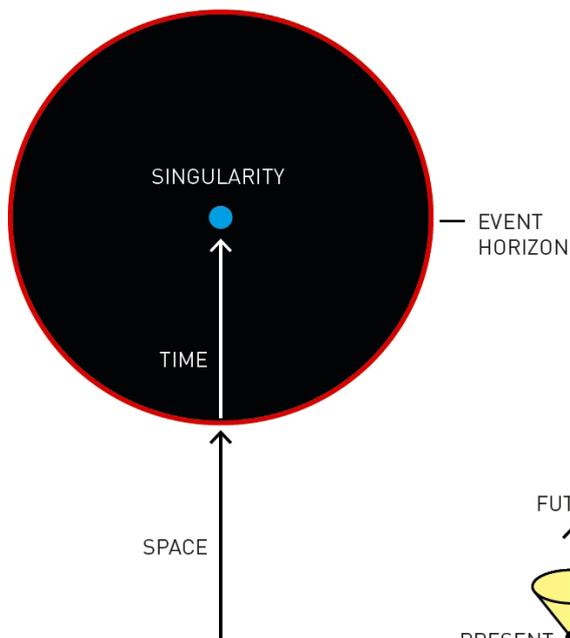
descubrimientos que permiten estudiar la población de agujeros de masa estelar y sus interacciones. El EHT continúa sus campañas de observación y es de esperar que desvelará en breve nuevos secretos de los objetos supermasivos, incluyendo SgrA\*.

Además, junto con los agujeros negros, hay otros resultados astrofísicos (o muy conectados con la astrofísica) que han sido merecedores del Nobel en la última década: la expansión acelerada del universo (2011), el bosón de Higgs (2013), las oscilaciones de los neutrinos (2015), las ondas gravitacionales (2017), el descubrimiento de los exoplanetas (2019) y la cosmología física (2019). Estos resultados, y su reconocimiento por una amplia comunidad científica, en el marco de la física, son una muestra de que nuestra ciencia se hace cada vez más interdisciplinar y más dinámica. Otros temas, como la astronomía multimensajero, los fenómenos transitorios y la exobiología, están experimentando ahora un auge impresionante. Es una suerte vivir en esta edad de oro de la astronomía, sobre todo para nosotros, astrónomos y astrónomas, que tenemos el privilegio de vivirla desde primera fila.

Conos de luz en las cercanías de un agujero negro, en el horizonte de sucesos y en su interior. Una vez cruzada la frontera, el tiempo reemplaza el espacio y todo apunta hacia la singularidad en su centro.  
 Créditos: Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

## Cross section of a black hole

When a massive star collapses under its own gravity, it forms a black hole that is so heavy that it captures everything that passes its event horizon. Not even light can escape. At the event horizon, time replaces space and points only forward. The flow of time carries everything towards a singularity furthest inside the black hole, where density is infinite and time ends.



The light cone shows the paths of the light rays forward and backward in time. When matter collapses and forms a black hole, the light cones that cross the black hole's event horizon will turn inward, toward the singularity. An outside observer will never really see the light rays reach the event horizon, they just nudge it. No one can see further in.

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.

## **HÉCTOR GIL MARÍN, PREMIO INVESTIGADOR JOVEN EN FÍSICA TEÓRICA RSEF-BBVA**

Héctor Gil Marín, del Institut de Ciències del Cosmos-UB, ha sido el ganador del Premio Investigador Joven en Física Teórica de los Premios de Física "Real Sociedad Española de Física - Fundación BBVA 2020". El jurado destaca «sus sobresalientes contribuciones al análisis e interpretación de cartografiados de galaxias, avanzando nuestra comprensión del Universo acelerado, siendo sin duda uno de los más brillantes investigadores en el campo de la cosmología de su generación». ¡Enhorabuena Héctor!!

## **SILBIA LÓPEZ LACALLE, PREMIO PRISMAS**

Nuestra colega Silbia López de Lacalle, responsable de la Unidad de Cultura Científica del IAA-CSIC, ha recibido el Premio Prismas de la Casa de las Ciencias a la Divulgación 2020, en su modalidad de mejor texto inédito, por "Expedición al volcán de sal". El jurado ha apreciado la belleza de los textos e ilustraciones, capaces de conquistar y llevar de viaje tanto a personas interesadas por la geología como por el arte. ¡Enhorabuena, Silbia!!

## **PRISMAS "HONORÍFICO" A LA AGRUPACIÓN ÍO**

Siguiendo con los premiados en los Prismas de este año, queremos dar la enhorabuena a la Agrupación Astronómica Coruñesa Ío, que ha sido galardonada con una Mención honorífica por su fantástica campaña para poner a una estrella el nombre "Rosafía de Castro" y a su planeta el de "Río Sar", consiguiendo «que el entusiasmo de una iniciativa popular pusiera en el firmamento el nombre de la escritora gallega más universal».

## **RENOVACIÓN DE LA JUNTA DIRECTIVA DE LA SEA**

En enero se hará efectiva la renovación de 3 de los 6 miembros de la Junta directiva de nuestra Sociedad. Los miembros entrantes son Minia Manteiga (vicepresidenta), Ramón Oliver (tesorero) y Pepa Becerra (vocal). Los salientes son Cesca Figueras (presidenta), Mercedes Mollá (tesorera) y Manuel Collados (vocal). El nuevo presidente será Benjamín Montesinos. Queremos desear lo mejor a los nuevos miembros entrantes y a los salientes agradecerles de corazón todo el tiempo que han dedicado al buen funcionamiento de nuestra Sociedad y, por ende, a la astronomía en nuestro país, en especial durante tiempos muy complicados que culminaron con la primera reunión científica completamente virtual de la historia de la SEA.

## **NUEVA COORDINADORA DEL BOLETÍN DE LA SEA**

Como ya sabréis (si habéis leído la noticia anterior) Manuel Collados deja la Junta de la SEA y con ello la coordinación del comité editorial que publica el boletín semestral de la Sociedad. Los que participamos en la redacción queremos darle las gracias públicamente por su dedicación a esta tarea, que a veces implica tener que ser pesado con los colegas que tardan en mandar sus contribuciones, y hacerle saber que ha sido un placer trabajar con él estos años. A partir de ahora la coordinadora será Pepa Becerra, con quien estamos deseosos de empezar a preparar ya el próximo número.

## **HÉCTOR CASTAÑEDA, DESCANSE EN PAZ**

Recientemente ha fallecido en México nuestro compañero Héctor Castañeda, que durante más de 20 años trabajó en el Instituto de Astrofísica de Canarias. Entre otras muchas tareas fue uno de los responsables del diseño y desarrollo del instrumento OSIRIS a lo largo de todas sus fases, incluida su explotación a través del proyecto OTELO. Descanse en paz.

## **¡HASTA SIEMPRE, ARECIBO!**

Muchos de los radioastrónomos de nuestra sociedad han utilizado el icónico radiotelescopio de Arecibo durante casi seis décadas. Su "decomisionado" ha sido un poco más violento y traumático de lo que hubiéramos podido desear o prever, pero siempre nos quedarán las montañas de datos y descubrimientos científicos que nos ha ofrecido durante su vida útil, además de espectaculares imágenes en varias películas, como Contact (basada en el libro homónimo de Carl Sagan) y Golden Eye (la peli de James Bond de 1995).

## FOTOGRAFIAR LO INVISIBLE

Vicent Peris

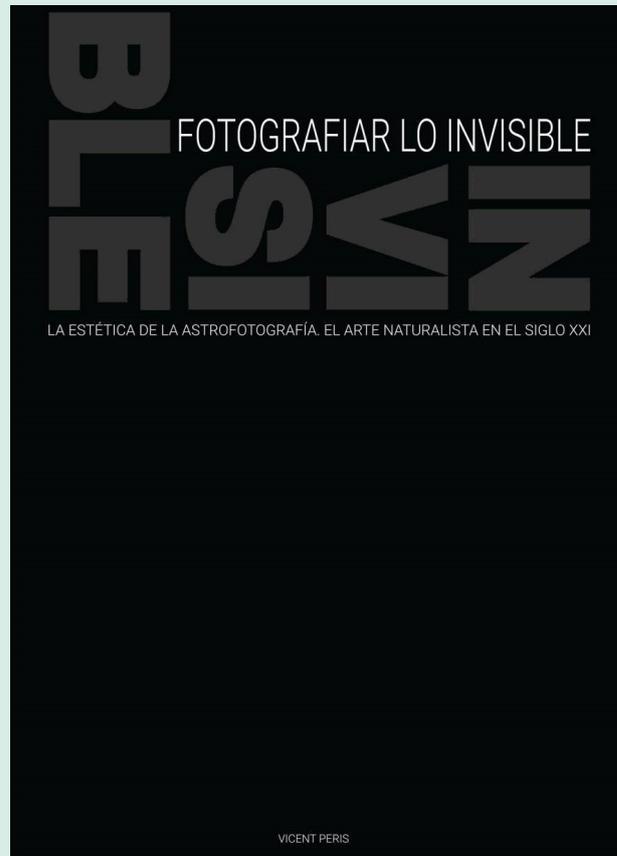
ISBN: 978-84-09-24862-9

Editorial Comunicaci3n Gr1fica

Con el subt3tulo "La est3tica de la astrofotograf3a. El arte naturalista en el siglo XXI", el libro que hoy nos ocupa es una rara avis dentro del panorama de libros de tem1tica astron3mica, puesto que es un texto de 3tica y est3tica de la fotograf3a astron3mica. Su autor es uno de los astrofot3grafos espa1oles con mayor proyecci3n internacional, y en su libro nos habla tanto de la 3tica de la fotograf3a astron3mica (de c3mo debe evitarse la manipulaci3n y retocado del objeto fotografado, de qu3 es y qu3 no es procesar una imagen para que no pierda su car1cter documentalista...), como de la est3tica que rige este procesado para que la astrofotograf3a pueda considerarse un arte con may3sculas. Estamos por tanto ante un libro de arte y de filosof3a del arte, as3 como de su relaci3n con la ciencia.

La astrofotograf3a tiene mucho que decir en el siglo XXI. La forma de fotografar el Universo aporta una visi3n de la naturaleza y de la posici3n que el hombre ocupa en ella que son necesarios en la realidad social actual. Aporta tambi3n un cambio de perspectiva tanto a nivel filos3fico como art3stico y de transmisi3n de conocimientos. La fotograf3a astron3mica nos proporciona unas im1genes sorprendentes, conmovedoras, de una belleza inesperada, que requieren un gran esfuerzo tanto t3cnico como creativo. Con este texto, pensado para que el amante del arte pueda valorar la astrofotograf3a, descubriremos la vertiente art3stica de esta disciplina y su mensaje hacia la sociedad. Veremos que es un arte altamente interdisciplinar donde astronom3a, matem1ticas, fotograf3a, procesamiento de imagen, pintura y m3sica se combinan para crear un lenguaje pict3rico 3nico y con identidad propia. Veremos que hay un largo camino para hacer que el resultado final del procesado astron3mico sea conmovedor y produzca esa sensaci3n de conexi3n c3smica y v3rtigo. Y descubriremos c3mo las vanguardias pict3ricas de principios del siglo XX tienen mucho que ver con c3mo se construye este lenguaje, o como lo describe el propio autor, «Gracias en parte al proceso de maduraci3n por el que ha pasado la pintura durante el siglo XX, podemos ahora mirar con profundidad a nuestro exterior despu3s de haber aprendido a mirar a nuestro interior».

El autor es uno de los miembros fundadores de la Escuela Documentalista de Astrofotograf3as (DSA por sus siglas en ingl3s). En su declaraci3n de principios, esta escuela define la astrofotograf3a como la «fotograf3a



documental de objetos celestes: el astrofot3grafo fotograf3a un patrimonio de la naturaleza que transmite al espectador. Partiendo de este hecho fundamental, la Escuela Documentalista basa su labor en poner al alcance del espectador 3nica y exclusivamente la informaci3n sobre el objeto natural fotografado. Por lo tanto, la astrofotograf3a es una forma de comunicaci3n gr1fica que permite difundir y divulgar informaci3n sobre los objetos celestes fotografados». En este libro se habla de diferentes t3cnicas, enfoques y filosof3as sobre el tratamiento de la imagen astron3mica; todas ellas parten del principio rector remarcado en la anterior declaraci3n. En el libro se va no obstante m1s all1: se muestra c3mo el concepto de la abstracci3n de Kandinski, la pincelada impresionista o las diferentes escalas presentes en la m3sica de Rachmaninov tienen mucho que ver con las t3cnicas de astrofotograf3a desarrolladas por el autor, creando una estructura te3rica unificadora que le da sentido. Pero permita que no me extienda m1s sobre este punto, pues no quiero «destriparles» uno de los principales atractivos del libro, que estoy seguro disfrutar1n.

Fernando J. Ballesteros  
*Observatori Astron3mic  
de la Universitat de Val3ncia*

## Desde escalas de pársecs a unidades astronómicas: enfocando la formación de objetos estelares jóvenes de gran masa

Autor: Rubén Fedriani López  
(ruben.fedriani@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: : Alessio Caratti o Garatti, Deirdre Coffey y Tom Ray  
Centro: Dublin Institute for Advanced Studies (DIAS), University College Dublin (UCD)  
Fecha de lectura: 8 de enero de 2020

En esta tesis, he investigado la formación de objetos estelares jóvenes de gran masa y las propiedades de sus chorros protoestelares.

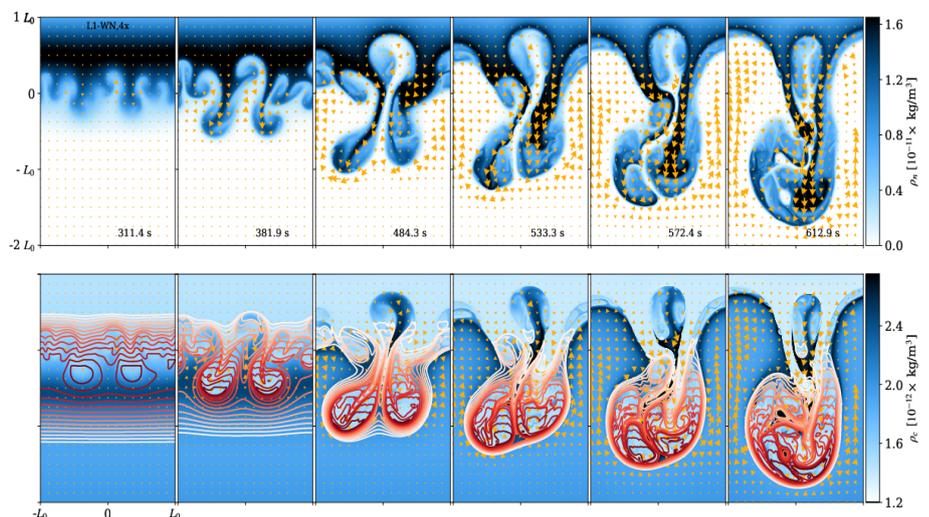
Mi primer capítulo de ciencia es un estudio de las propiedades cinemáticas y dinámicas de la protoestrella de veinte masas solares IRAS13481-6124 (Fedriani et al., 2018). Medí tasas de pérdida de masa y momento de  $10^4 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  y  $10^2 M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ km s}^{-1}$ , respectivamente. Usé líneas de emisión de hidrógeno (H I) para aplicar la técnica de espectro-astrometría. Con ello, exploramos el chorro de la protoestrella masiva a escalas de unidades astronómicas y lo conectamos con el chorro a escalas de pársecs.

En el segundo capítulo de ciencia, estudié el caso único de G35.02-0.74N, una protoestrella de diez masas solares (Fedriani et al., 2019). Observé emisión atómica en el infrarrojo cercano y emisión ionizada en el radio espacialmente coincidente en el chorro. Por primera vez, fue posible medir la fracción de

ionización en un chorro lanzado por una protoestrella masiva. El valor obtenido ( $\sim 10\%$ ) es similar a los encontrados en los chorros lanzados por protoestrellas de poca masa. Esto sugiere un mecanismo común de lanzamiento, esto es, el chorro es lanzado magneto-centrifugalmente. Fue posible medir tasas de pérdida de masa y momento en el orden de  $10^5 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  y  $10^2 M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ km s}^{-1}$ , respectivamente, sin tener que asumir la fracción de ionización. Este estudio también confirma que el mecanismo de ionización está relacionado con los choques en vez de con la radiación ultravioleta proveniente de la estrella. El nuevo método usado en este artículo, el cual combina medidas en el infrarrojo cercano y radio, abre una nueva forma de medir la fracción de ionización en chorros tanto en protoestrellas de poca masa como de gran masa.

Por último, el chorro y el disco de acreción de la protoestrella masiva IRAS11101-5829, que dirige el objeto Herbig-Haro 135/136, fue investigado en el tercer capítulo de ciencia (Fedriani et al., 2020). Encontré emisión del disco por primera vez en este objeto, trazado por la emisión de monóxido de carbono (CO) observado en el infrarrojo cercano a  $2,29\text{-}2,5 \mu\text{m}$ . Usando nuestro propio modelo en Equilibrio Termodinámico Local, inferí que la emisión es consistente con un disco relativamente cálido ( $T \sim 3000 \text{ K}$ ) y denso ( $N_{\text{CO}} \sim 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ). Notablemente, el modelo también sugiere una geometría diferente de la inferida por el chorro, la cual se obtuvo a través del análisis de líneas de emisión espectrales e imágenes. Esto implica que la emisión del disco está reflejada en los muros creados por el chorro. Este enfoque ha sido utilizado por primera vez en esta tesis e indica que para obtener la geometría correcta del sistema se necesitan tanto gran resolución espacial como espectral para evitar la obtención de resultados erróneos.

Los resultados presentados en esta tesis muestran pruebas observacionales adicionales de que la formación de objetos estelares jóvenes de gran masa y sus chorros son una versión escalada de las protoestrellas de poca masa y que estas propiedades se escalan con la masa del objeto central. A la luz de estos resultados, estamos un paso más cerca de confirmar que la formación estelar procede de una manera similar independientemente de la masa.



## Simulación de la cromosfera solar en la aproximación de dos fluidos

Autora: Beatrice Popescu Braileanu  
(bpopescu@iac.es)

Tesis doctoral dirigida por:

Elena Khomenko y Angel de Vicente

Centro: Universidad de La Laguna

Fecha de lectura: 1 de abril de 2020

Este trabajo presenta el estudio numérico de la propagación de ondas y la inestabilidad Rayleigh-Taylor en la atmósfera solar usando un modelo de dos fluidos. La atmósfera solar está fuertemente estratificada y con campos magnéticos complejos, creando capas con regímenes muy diferentes. La fotosfera es la capa más densa con campo magnético más intenso. La gran densidad hace que el plasma esté completamente acoplado por colisiones y que la aproximación del modelo magnetohidrodinámico (MHD) sea válida. La corona está totalmente ionizada y dominada por el campo magnético. Debido a la disminución de la densidad, las frecuencias de colisión también decrecen desde la fotosfera hacia la corona. En estos casos límite, de la fotosfera completamente acoplada por colisiones y la corona completamente ionizada y sin acoplamiento colisional, las simulaciones que usan modelos MHD dan resultados muy buenos comparados con las observaciones, pero esta situación no es el caso de la cromosfera. La cromosfera es una capa dinámica de la atmósfera solar situada entre la fotosfera y la corona. Es una capa de transición donde la evolución del plasma cambia de estar dominada por la presión del gas a estar dominada por el campo magnético, y donde el acoplamiento colisional decrece y la fracción de ionización crece. El tiempo medio entre las colisiones entre cargas y neutros es del mismo orden que el tiempo característico de evolución de las variables hidrodinámicas. Eso hace que los neutros y las cargas se desacoplen parcialmente y que la aproximación MHD clásica no sea válida en la cromosfera. Una alternativa al modelo MHD es un modelo de dos fluidos que ha sido implementado de forma numérica en este trabajo.

La complejidad de la atmósfera solar hace que sea imposible resolver de forma analítica las ecuaciones, así que los problemas se resuelven de forma numérica mediante simulaciones. Hemos extendido el código MHD no ideal Mancha3D para implementar el modelo de dos fluidos. El código Mancha3D usa un esquema numérico temporal explícito, que presenta una serie de ventajas en el caso de simulaciones paralelas a gran escala en dominios 3D. Los efectos de ionización parcial se

tienen en cuenta en la aproximación MHD a través de la ley de Ohm generalizada. Sin embargo, el modelo de dos fluidos introduce términos de acoplamiento colisional, lo que puede hacer que un código con un esquema numérico explícito se haga numéricamente inestable. Para asegurar la estabilidad cuando los términos colisionales se incluyen en un esquema explícito, el paso temporal necesario para integrar temporalmente las ecuaciones es inversamente proporcional a la frecuencia de colisión. Esta restricción se puede evitar implementando los términos colisionales de manera implícita. En el nuevo código, tratamos dichos términos de forma implícita usando un esquema semiimplícito.

Para probar el esquema numérico y determinar el orden de convergencia del esquema, hacemos unos tests de ondas acústicas y Alfvén en un medio uniforme, donde la solución numérica se puede comparar con la solución analítica exacta. Después hacemos simulaciones más realistas de ondas magnetoacústicas rápidas, usando el modelo de la atmósfera solar VALC. En los dos casos observamos amortiguamiento de las ondas, que es más grande cuando la frecuencia de colisión es parecida a la frecuencia de la onda. Los resultados son consistentes con resultados presentados en la literatura. Cuando la amplitud es suficientemente grande, podemos observar el mecanismo adicional de *damping* no lineal que no puede ser predicho por una solución analítica, pero se puede apreciar a través de simulaciones numéricas. Hemos hecho una simulación usando el modelo MHD y una configuración correspondiente a la configuración para el modelo de dos fluidos, donde la interacción entre neutros y cargas se introduce a través del término ambipolar en la ecuación de inducción. Observamos que aunque el *damping* de la onda es parecido en los dos casos, el aumento en la temperatura es mayor en el modelo con dos fluidos comparado al modelo MHD.

En la última parte presentamos simulaciones de la inestabilidad Rayleigh-Taylor (RTI) en la interfaz entre una protuberancia y la corona solar. Estudiamos la tasa de crecimiento, el desacoplamiento y los modos dominantes en un modelo donde la transición entre la prominencia y la corona es continua con una escala característica. Realizamos varias simulaciones donde estudiamos el efecto de las colisiones elásticas e inelásticas, la viscosidad y la conductividad térmica, la compresibilidad, la configuración del campo magnético, el contraste de densidad y la perturbación inicial sobre el desarrollo de la inestabilidad. En estas simulaciones hemos considerado la ley de Ohm ideal (sin difusividad magnética). Observamos que la tasa de crecimiento lineal es menor que en el caso MHD (completamente acoplado por colisiones) ideal (sin viscosidad y conductividad térmica) e incompresible. En el modelo MHD ideal sin campo magnético, la compresibilidad aumenta la tasa de crecimiento lineal para nuestro perfil de densidad.

Tesis disponible en TESEO: <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFichaConsulta.do?idFicha=622256>

Página anterior: Evolución de la densidad de neutros (arriba) y cargas (abajo) en el tiempo en una simulación con alta resolución de la inestabilidad Rayleigh-Taylor con campo sheared. En el panel de la densidad de cargas se dibujan también las líneas del campo magnético contenido en el plano de la inestabilidad. El tiempo está indicado en los paneles de la densidad de los neutros.

## Caracterización espectral de la superficie del asteroide (101955) Bennu a través del conjunto instrumental OCAMS de la sonda OSIRIS-REx

Autor: Juan Luis Rizos García  
(juanluisrizos@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Javier Licandro y Julia de León

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias

Fecha de lectura: 28 de abril de 2020

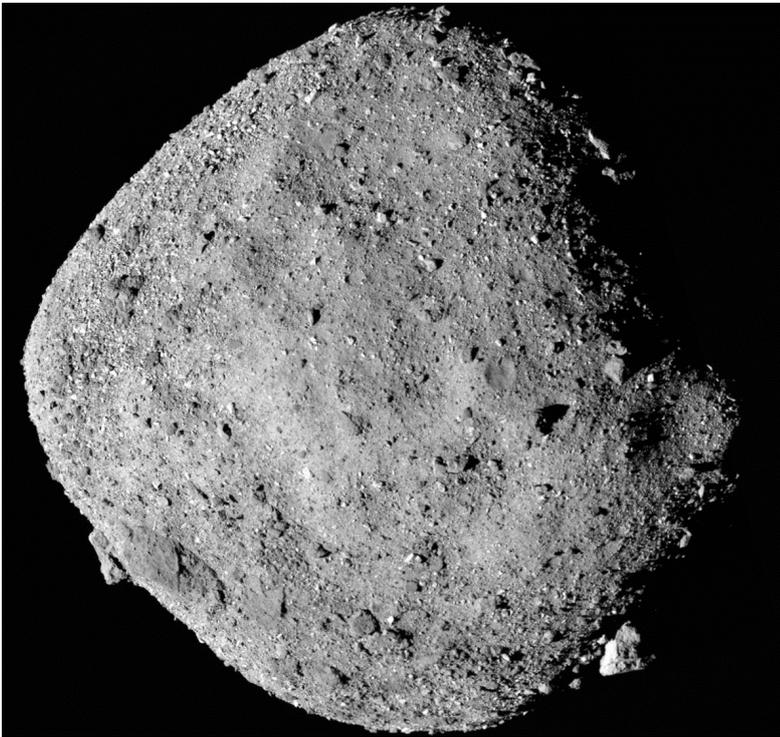
Los asteroides son objetos resultantes de las colisiones y evolución dinámica de los planetesimales originarios del Sistema Solar. Algunos de estos planetesimales originarios —formados en el disco protoplanetario como consecuencia de la agregación de gas y polvo— sobrevivieron al proceso de formación planetaria y permanecen prácticamente inalterados. Este es el caso de (101955) Bennu, un asteroide primitivo y cercano a la Tierra cuyo estudio será fundamental para entender las primeras etapas de formación del Sistema Solar, así como para resolver algunos de los mayores interrogantes acerca de la aparición del agua, y posteriormente la vida, en la Tierra. Con este propósito, la misión OSIRIS-REx de la NASA partió hacia el asteroide Bennu en septiembre de 2016. Equipada con un amplio abanico instrumental, cuenta entre otros dispositivos con MapCam, una cámara en el visible equipada con 4 filtros de color b', v, w y x centrados en 473, 550, 698 y 847 nm respectivamente, con objeto de caracterizar espectralmente la superficie del asteroide. En esta tesis presentamos los resultados de dicha caracterización, así como la metodología de análisis espectral de grupos (spectral clustering) diseñada para tal propósito.

La validación de esta metodología la llevamos a cabo utilizando imágenes de (1) Ceres adquiridas con la Framing Camera de la misión Dawn. Además de constatar su eficiencia, nos permitió identificar una banda de absorción en 700 nm con una profundidad de  $(3,4 \pm 1,0)\%$  en la región exterior del cráter Occator. Esta identificación, la primera hasta la fecha, apunta a la posible presencia de silicatos hidratados ricos en Fe en esa región, y está en buen acuerdo con los mecanismos

planteados por otros autores para explicar la presencia de sales hidratadas en el centro del cráter.

A continuación, aplicamos nuestro método a (101955) Bennu, obteniendo una caracterización global de su superficie. Los resultados muestran una homogeneidad espectral muy marcada, así como una clara correlación entre enrojecimiento espectral y regiones de bajo albedo, lo que podría estar directamente relacionado con los efectos de la climatología espacial (space weathering). Estas regiones asimismo muestran indicios de la presencia de una posible banda de absorción centrada en 550 nm, identificada fundamentalmente por un incremento de la reflectancia en el filtro b', si bien los resultados no son concluyentes. Realizamos a su vez una caracterización local focalizada en las regiones de interés seleccionadas por el equipo científico como candidatas a la recolección de una muestra de la superficie. Constatamos que dicha homogeneidad se preserva. En ninguno de los análisis globales o locales la relación señal a ruido hace posible identificar la banda de absorción de 700 nm.

Finalmente, y como añadido de esta tesis doctoral, identificamos 45 zonas candidatas a material exógeno distribuidas a lo largo de la superficie del asteroide. De entre todas, los datos recogidos por el espectrómetro OVIRS para 6 de ellas confirman inequívocamente que se trata de material basáltico (píroxeno) formado en un cuerpo externo. La explicación más plausible a la presencia de estos materiales en la superficie de Bennu es considerarlos procedentes del asteroide (4) Vesta. En cualquier caso, habrá que esperar a los análisis de la muestra recogida para dilucidar de un modo más certero esta cuestión.



(101955) Bennu en el momento de la llegada de la sonda OSIRIS-REx. Se trata de un mosaico compuesto por 12 imágenes adquiridas por OCAMS a una distancia de 24 kilómetros el 2 de diciembre de 2018. Créditos: NASA/Goddard/University of Arizona.



Cae la larga noche en el recientemente colapsado Observatorio de Arecibo, en Puerto Rico. En la imagen se muestra el foco con la cúpula gregoriana, ya inexistentes. Créditos: Nadia Drake.



**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