

SOLAR ORBITER Y LAS PRIMERAS

El Sol, nuestra estrella más cercana, es el motor de la vida en la Tierra y el origen del tiempo espacial —conjunto de fenómenos que determinan el estado físico de nuestro medioambiente planetario inmediato y que afectan a múltiples aspectos de nuestra sociedad, cada vez más dependiente de la tecnología—. Comprender el comportamiento del Sol, tanto en su interior como en su atmósfera, y cómo esta interactúa con el campo magnético, es esencial no solo para entender su naturaleza, sino también para anticipar fenómenos como las tormentas solares, que constituyen la manifestación más extrema de su influencia. Sin embargo, y a pesar de todo lo que uno pueda imaginar, uno de los mayores enigmas sigue siendo el origen de su ciclo magnético de 22 años (cada 11 años, el campo global dipolar de la estrella invierte su polaridad), y en particular, el papel que desempeñan los polos solares en este ciclo.



David Orozco Suárez
orozco@iaa.es

Hanna Strecker
strecke@iaa.es

Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC)

LA MISIÓN SOLAR ORBITER: UNA NUEVA VENTANA AL SOL

Este ciclo está gobernado por la dinámica solar, resultado de la interacción de la convección con la rotación diferencial, que genera y mantiene su campo magnético. Las medidas del vector campo magnético son cruciales para entender dicho ciclo. Dichas medidas, que precisan un análisis espectropolarímetro de la luz, tienen un sesgo fundamental: la precisión es mayor cuando el campo está dirigido a lo largo de la línea de visión (cuando la luz está mayoritariamente polarizada circularmente) que cuando es perpendicular a la misma (cuando está fundamentalmente polarizada linealmente). Resulta, pues, fácil de entender que la medida del campo magnético en los polos es un verdadero reto observational no salvado hasta el vuelo de la nave Solar Orbiter [1] de la ESA, con contribuciones de NASA.

Tras cinco años de órbitas alrededor del Sol, Solar Orbiter comienza a ofrecer medidas más precisas de los campos magnéticos polares y esperamos que la precisión siga aumentando conforme la nave va separándose del plano de la eclíptica.

La misión combina instrumentos de observación remota y de medición in situ para estudiar el Sol, el viento solar y la heliosfera en su conjunto. Su órbita es altamente elíptica, lo que le permite acercarse hasta 0,28 unidades astronómicas y, mediante una serie de asistencias gravitatorias con Venus, inclinarse progresivamente hasta alcanzar 33° sobre el ecuador solar en la próxima década (véase la figura 1).

Este diseño orbital es crucial: cuanto mayor sea la inclinación, mejor será la visibilidad de los polos. En marzo de 2025, la nave alcanzó una inclinación de 17°, logrando las primeras imágenes directas de los polos de nuestra estrella, un hito histórico para la física solar y, si cabe, para la exploración espacial.

¿POR QUÉ SON IMPORTANTES LOS POLOS SOLARES?

El cambio undecenal de polaridad magnética está estrechamente ligado a la evolución del campo en las regiones polares. Se considera bien establecido que las corrientes de plasma transportan hacia las regiones polares el campo magnético generado por la actividad en las zonas ecuatoriales. Estas corrientes continuas, conocidas como "flujos meridionales" por influjo del inglés "meridional flux", aunque

OBSERVACIONES POLARES DEL SOL

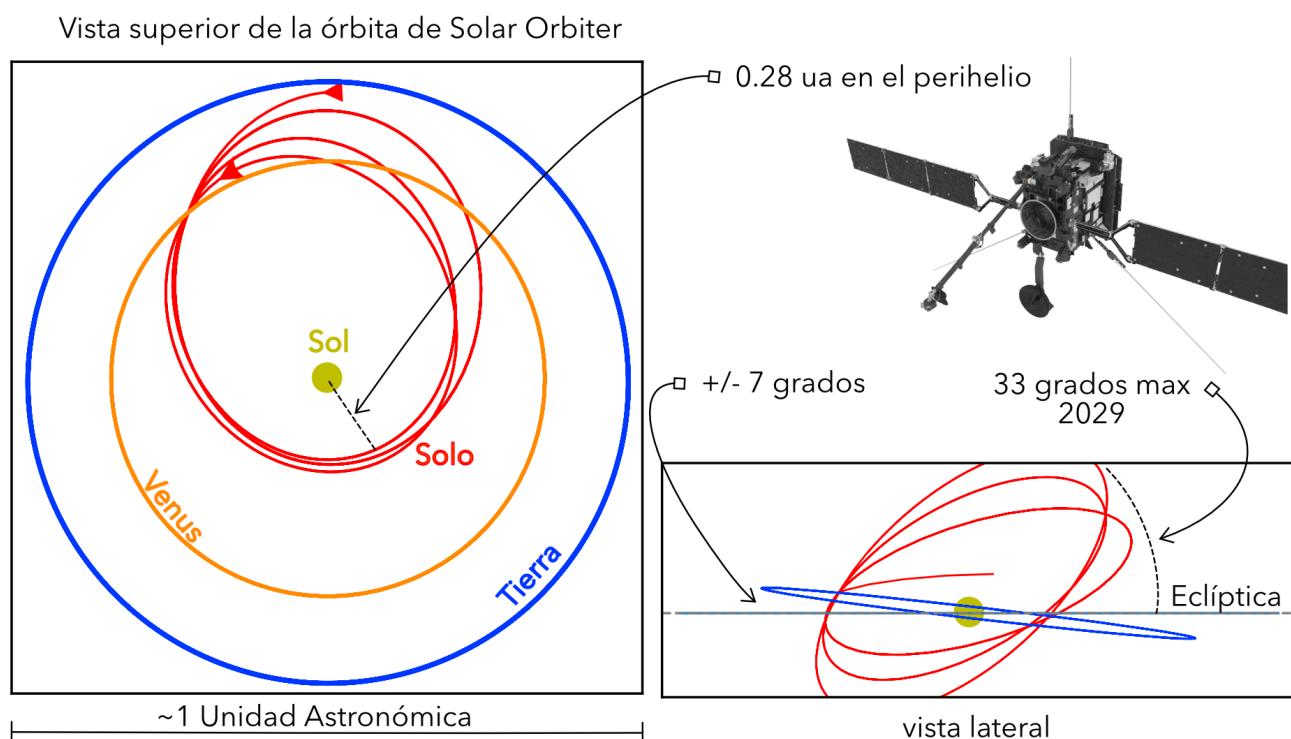
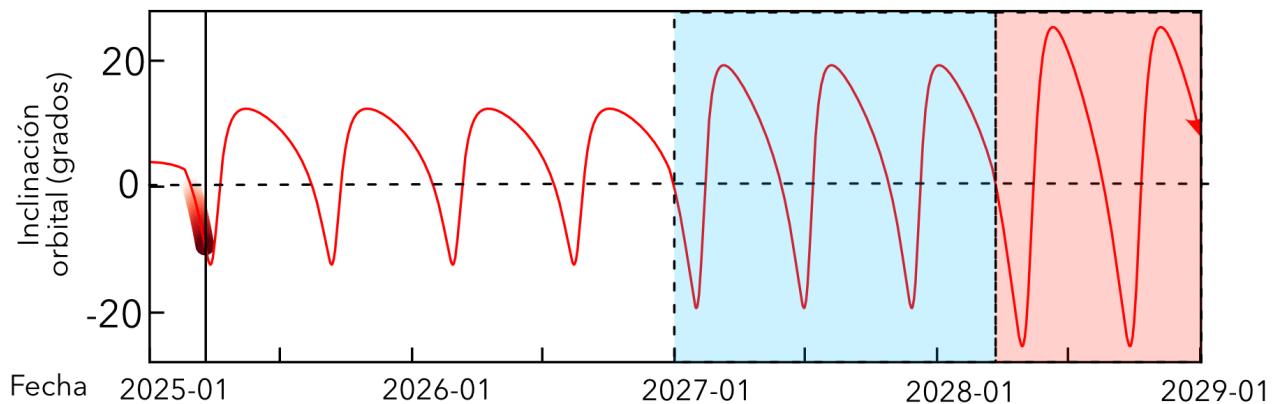


Figura 1. Esquema de la órbita de Solar Orbiter que muestra la inclinación creciente respecto al plano de la eclíptica y las posiciones de perihelio.

tal uso debe rechazarse en español ya que el adjetivo meridional hace referencia al Sur, conducen a la acumulación progresiva de flujo magnético en los polos y sus alrededores, donde el campo unipolar existente se debilita gradualmente y acaba siendo reemplazado por otro de su polaridad opuesta. Así, los polos actúan como la “memoria” del ciclo solar, almacenando el flujo que sembrará la configuración magnética del siguiente ciclo [2].

De hecho, la intensidad y la simetría del campo polar en cada mínimo solar determinan en gran medida la fortaleza y la morfología del ciclo siguiente.

Además, los polos son la fuente del viento solar rápido, que modula la heliosfera y condiciona la propagación de las eyeciones de masa coronal. Comprender la dinámica y la estructura del campo magnético polar resulta, por tanto, esencial para caracterizar la interac-

ción entre el Sol y el medio interplanetario. En ausencia de observaciones directas, los modelos de dínamo solar han dependido históricamente de extrapolaciones, simulaciones numéricas y mediciones helioseismológicas, que aportan información del interior solar, aunque están limitadas principalmente a la zona ecuatorial.

Pese a su papel central, las regiones polares han permanecido entre las menos exploradas del Sol debido a las limitaciones geométricas impuestas por nuestra posición en el plano de la eclíptica [3]. Solar Orbiter ha superado esta limitación al obtener las primeras observaciones directas de las regiones polares desde fuera de este plano, proporcionando la prueba empírica necesaria para validar los modelos actuales de dínamo solar y poder entender mejor el origen del viento solar y las implicaciones en la heliosfera. Así mismo, estas medidas más precisas podrán alimentar mejor los modelos del medio interplanetario y la heliosfera que se usan para entender el tiempo espacial.

SO/PHI: EL INSTRUMENTO ESPAÑOL QUE MIRA AL CORAZÓN MAGNÉTICO DEL SOL

El Polarimetric and Helioseismic Imager (SO/PHI, por sus siglas en inglés) es uno de los diez instrumentos a bordo de la misión Solar Orbiter, y el único diseñado específicamente para medir el campo magnético de la fotosfera solar. Permite obtener mapas vectoriales del campo magnético, esto es, mapas de la intensidad de campo magnético, así como de su inclinación y azimut.

SO/PHI está coliderado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC). En España, la coordinación científica y tecnológica de SO/PHI se articula a través de la Red Española de Física Solar Aeroespacial (S³PC [4]), liderados por el *Grupo de Física Solar (SPG)* del IAA-CSIC e integrada por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial “Esteban Terradas” (INTA), la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), la Universitat de València Estudi General (UVEG) y el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). En el desarrollo de SO/PHI también participó la Universidad de Barcelona. Además, España cuenta con otro investigador principal (IP) en la misión Solar Orbiter: el del instrumento *Energetic Particle Detector (EPD)*, liderado por la Universidad de Alcalá.

En funcionamiento desde febrero de 2020, SO/PHI realiza medidas espectropolarimétricas en la línea Fe I 617.3 nm con una resolución de ~ 10 pm y una precisión polarimétrica de 10^{-3} . El instrumento combina dos telescopios complementarios: el telescopio de disco completo (FDT), que obtiene imágenes del disco solar completo, y el telescopio de alta resolución (HRT), capaz de alcanzar una resolución espacial de hasta unos 0,3 segundos de arco, equivalente a 150–200 km en el perihelio. El instrumento incluye procesamiento de datos a bordo, lo que permite reducir y optimizar la telemetría, así como un sistema avanzado de estabilización de imagen que compensa las vibraciones y movimientos de la nave. Además de medir el campo magnético, SO/PHI proporciona medidas de las velocidades del plasma fotosférico a lo largo de la línea de visión, posibilitando estudios helioseísmicos que revelan la dinámica interna del Sol y, por tanto, de la dínamo solar.

PRIMERAS OBSERVACIONES POLARES: RESULTADOS Y SORPRESAS

La primera campaña de Solar Orbiter dedicada a la observación de los polos se llevó a cabo en marzo de 2025, utilizando todos los instrumentos de observación remota de la nave. Entre ellos, SO/PHI proporcionó mapas del campo magnético de ambos polos. La campaña de observación comenzó el 10 de marzo, durante el acercamiento de la nave al Sol. Desde ese día y hasta el 16 de marzo, SO/PHI observó el disco solar completo, con una visión preferente del polo sur y desde una latitud que varió entre -12.2 y -16 grados.

El 16 de marzo se alcanzó una latitud cercana a -16 grados (en el hemisferio sur) y SO/PHI cambió su configuración del telescopio de disco completo (FDT) al telescopio de alta resolución (HRT), para capturar las primeras observaciones polarizadas en alta resolución del polo sur solar (véase la imagen de la izquierda de la figura 2). Las observaciones consistieron en una serie de imágenes tomadas con una hora de diferencia entre ellas, a lo largo de los días 16 y 17.

El 22 de marzo, la nave alcanzó la latitud máxima de su órbita, -16.86 grados, y observó el polo sur con el FDT (véase la primera imagen de la figura 3). Solar Orbiter alcanzó el perihelio el 31 de marzo mientras continuaba observando con el FDT, y

cruzó el plano de la eclíptica para poder observar el polo norte. El 24 de abril observó este polo con el HRT y alcanzó la máxima latitud de +16.86 grados el día 28, momento en el que se encontraba a una distancia del Sol de unas 0.55 ua.

Las figuras 2 y 3 adjuntas muestran la secuencia de imágenes obtenidas con el FDT (polo sur a la izquierda, ecuador en el perihelio en el centro y polo norte a la derecha), así como dos de los mapas obtenidos con el HRT.

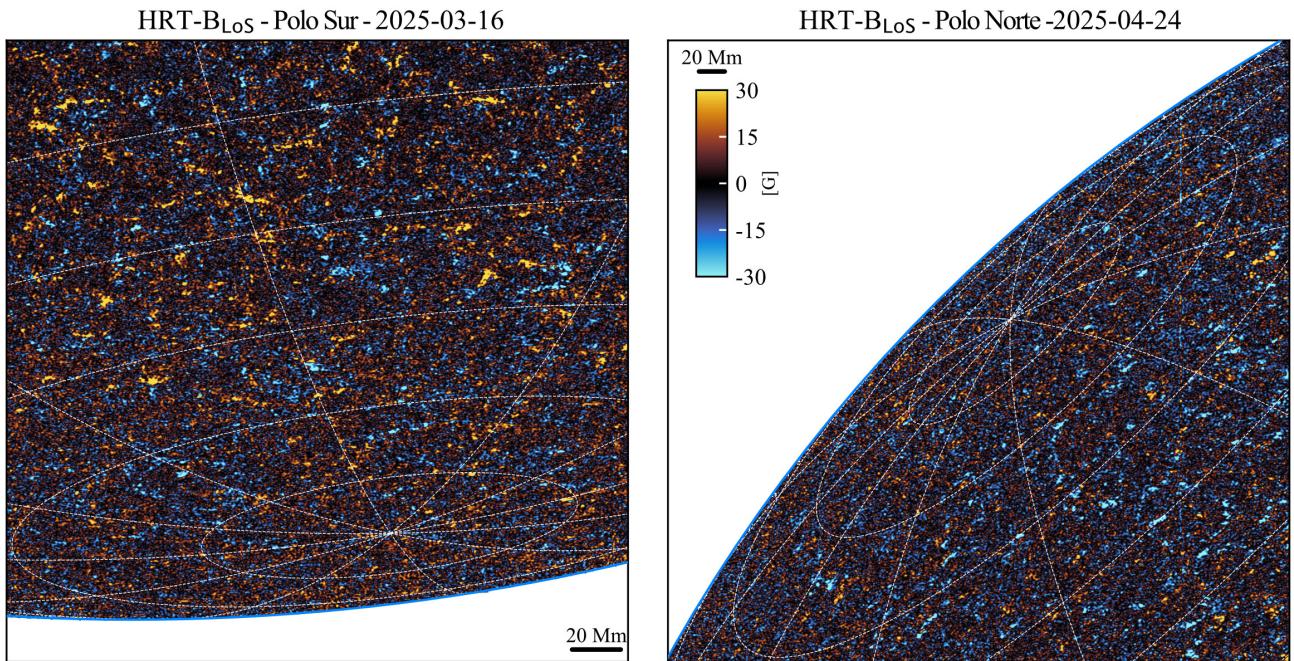
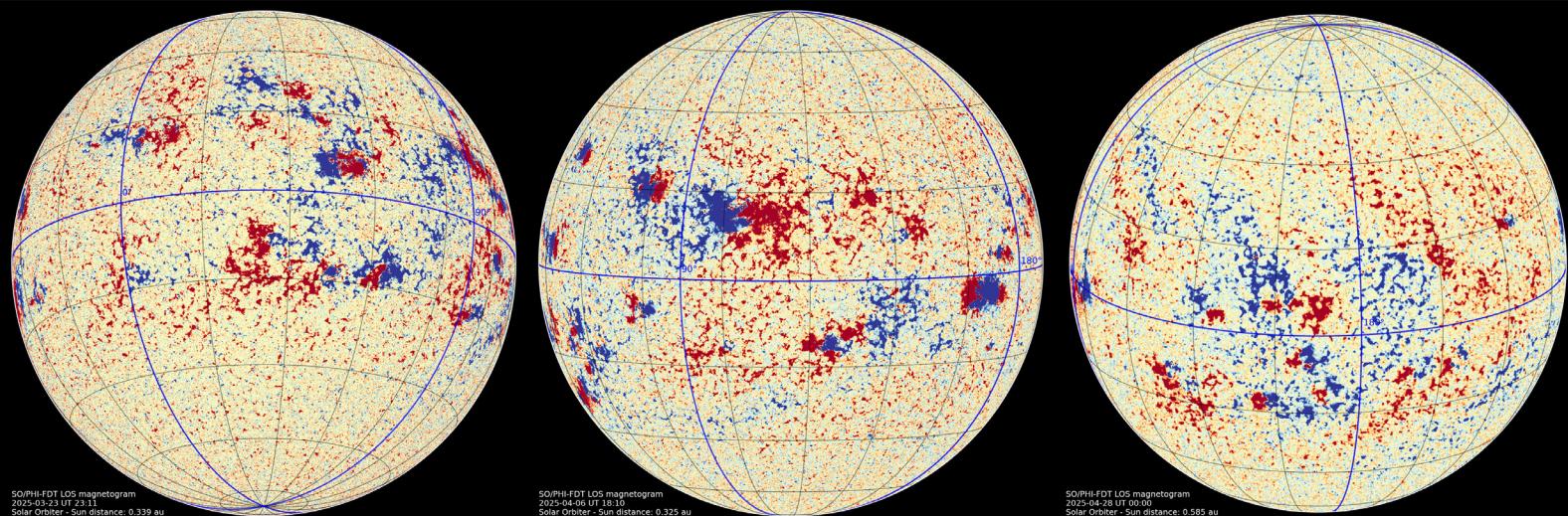


Figura 2. Imagen de alta resolución con el HRT (polos norte y sur) que muestran la componente longitudinal del campo magnético fotosférico.

Figura 3. Imágenes de la componente longitudinal del campo magnético fotosférico, saturadas en ± 20 G, obtenidas con el telescopio de disco completo de SO/PHI durante la campaña de observación de marzo de 2025. Los tres paneles muestran, por orden, el polo sur, la zona ecuatorial y el polo norte, correspondientes a los máximos de latitud alcanzados por la misión respecto al plano de la eclíptica.



Los mapas obtenidos con el FDT muestran claramente cómo la órbita de la nave permite tener un mejor punto de observación de las estructuras magnéticas del Sol en las regiones polares. Si nos fijamos en la imagen central, se observa claramente cómo las regiones activas (con sus polaridades opuestas en rojo y azul) se concentran en dos bandas situadas por encima y por debajo del ecuador solar.

La distribución del campo en las regiones activas cambia de signo entre los hemisferios norte y sur: en el hemisferio norte, la región activa que lidera es positiva, y en el sur ocurre lo contrario. Estas regiones se encuentran muy cercanas al ecuador, ya que nos encontramos en torno al máximo solar, cuando la actividad se concentra en latitudes más bajas.

Al dirigir la mirada hacia los polos, se aprecia que no existe mucha actividad magnética, aunque se pueden distinguir señales que corresponden a la presencia de concentraciones de campo fuerte, las cuales delinean la localización de los flujos convectivos supergranulares presentes justo debajo de la superficie solar. Dichas concentraciones muestran una polaridad dominante: positiva (roja) en el sur y negativa (azul) en el norte, alineadas con el signo del campo magnético global del Sol. El cambio de signo que se produjo durante el máximo del ciclo solar 25, alrededor de 2024.

Los datos obtenidos con el HRT revelan una realidad mucho más compleja (véase la figura 2). Si se observa con detalle, las estructuras más alejadas de las zonas polares son más intensas (es decir, presentan un campo magnético longitudinal mayor) y se aprecia claramente cómo el valor de dicho campo disminuye progresivamente a medida que nos acercamos al polo.

Esto se debe a la visión extremadamente tangencial de las regiones polares, que dificulta la determinación precisa del campo magnético. Por un lado, una visión tan oblicua provoca un acortamiento por perspectiva, en el que cada píxel abarca áreas mayores cuanto más oblicuo es el ángulo de observación, reduciendo así la resolución espacial efectiva. Esta disminución de resolución provoca que la amplitud de las señales de polarización se reduzca considerablemente, debido principalmente a dos factores: primero, a una mayor cancelación entre polaridades opuestas al

muestrear áreas más extensas de la superficie solar; y segundo, a la reducción del factor de llenado de las estructuras magnéticas dentro del mismo píxel.

Por otro lado, las concentraciones más intensas de campo tienen una orientación preferentemente vertical respecto a la superficie solar. Las señales de polarización circular son mayores cuando estas estructuras son observadas desde arriba, es decir, con un ángulo cercano a la normal a la superficie. A medida que el ángulo de observación se hace más oblicuo, la contribución de la polarización circular disminuye, mientras que aumenta la componente de polarización lineal, asociada al campo transversal. Sin embargo, la polarización lineal es también más sensible al ruido, lo que reduce la fiabilidad de las medidas en regiones polares observadas desde ángulos tan extremos. En este sentido, las observaciones del HRT nos han permitido obtener información desde latitudes entre los 14.9 y 16.7 grados, lo que representa una diferencia significativa a la hora de determinar con mayor precisión el campo magnético y su flujo en las regiones polares [5].

Una imagen combinada, que integra todas las observaciones del HRT durante la campaña de observación del polo sur, de aproximadamente 48 h, nos permite, por un lado, aumentar la relación señal a ruido y, por otro, obtener información sobre la dinámica de los campos magnéticos observados en la región polar. Si nos fijamos en la figura 4, en la que hemos utilizado una proyección azimutal para mejorar la visualización del polo, se observa que las estructuras de campo más alejadas del mismo (en la parte superior) aparecen ahora elongadas horizontalmente como consecuencia de la rotación solar (las estructuras se desplazan en sentido horario por la rotación). Estas estructuras muestran tendencias claras: algunas se desplazan hacia el ecuador (hacia arriba en la imagen) y otras hacia el polo (hacia abajo). En el propio polo, las estructuras no parecen tan elongadas, lo cual se debe tanto a que los efectos de rotación son menos evidentes en esas latitudes como a los efectos de proyección. Un análisis más detallado nos ha permitido confirmar la migración de la red magnética hacia los polos en promedio, a altas latitudes (por encima de 60°), con velocidades en el rango de 10 a 20 m s⁻¹ [6]. En resumen, las observaciones de Solar Orbiter están permitiendo superar una de las principales limitaciones de la observación terrestre: la visión extremadamente tangencial de las regiones polares, que complica la determinación precisa del campo magnético solar.

**«Gracias a SO/PHI,
España desempeña un
papel protagonista en
la resolución de uno de
los mayores enigmas
de la astrofísica: el
funcionamiento de la
dínamo solar y la influencia
de los polos en el ciclo
magnético.»**

PERSPECTIVAS FUTURAS Y CONCLUSIONES HASTA LA FECHA

La inclinación orbital de Solar Orbiter seguirá aumentando en los próximos años (véase la Figura 1), lo que permitirá observaciones aún más detalladas a partir de 2028, cuando la nave alcance latitudes de hasta 33 grados sobre la eclíptica. Durante ese período, el instrumento SO/PHI continuará siendo clave en estas campañas de observación y proporcionará datos sin precedentes sobre la estructura y evolución del campo magnético polar. Hasta la fecha, la misión se encuentra en un estado de funcionamiento excelente a pesar de los entornos tan agresivos a los que está sometida debido a su cercanía al Sol. Toda la instrumentación a bordo, incluidos los telescopios de disco completo y de alta resolución, está actualmente operativa y acumula observaciones científicas de gran valor.

Además, la sinergia con otras misiones como Parker Solar Probe (NASA), Hinode (JAXA/NASA) y telescopios terrestres de última generación como el DKIST americano (Daniel K. Inouye Solar Telescope), potenciará significativamente la ciencia solar en el próximo decenio, ofreciendo un panorama completo de la actividad solar desde la superficie hasta la corona así como del viento solar.

Solar Orbiter inaugura una nueva era en la exploración solar. Gracias a SO/PHI, España desempeña un papel protagonista en la resolución de uno de los mayores enigmas de la astrofísica: el funcionamiento de la dínamo solar y la influencia de los polos en el ciclo magnético. Estos avances no solo enriquecen nuestro conocimiento científico, sino que también son esenciales para mejorar la meteorología espacial. En este contexto, el Grupo de Física Solar del IAA-CSIC y la Red Española de Física Solar Aeroespacial (S³PC) lideran la participación española en iniciativas estratégicas como la misión Vigil del programa de seguridad espacial de la ESA, la primera misión europea dedicada a la meteorología espacial, operativa 24/7 desde el punto Lagrange L5, con lanzamiento previsto en 2031. La misión ofrecerá alertas tempranas de sucesos potencialmente peligrosos y modelos más precisos de nuestro entorno planetario espacial. El S³PC es corresponsable del desarrollo del instrumento PMI (de sus siglas en inglés, Photospheric Magnetic field Imager).

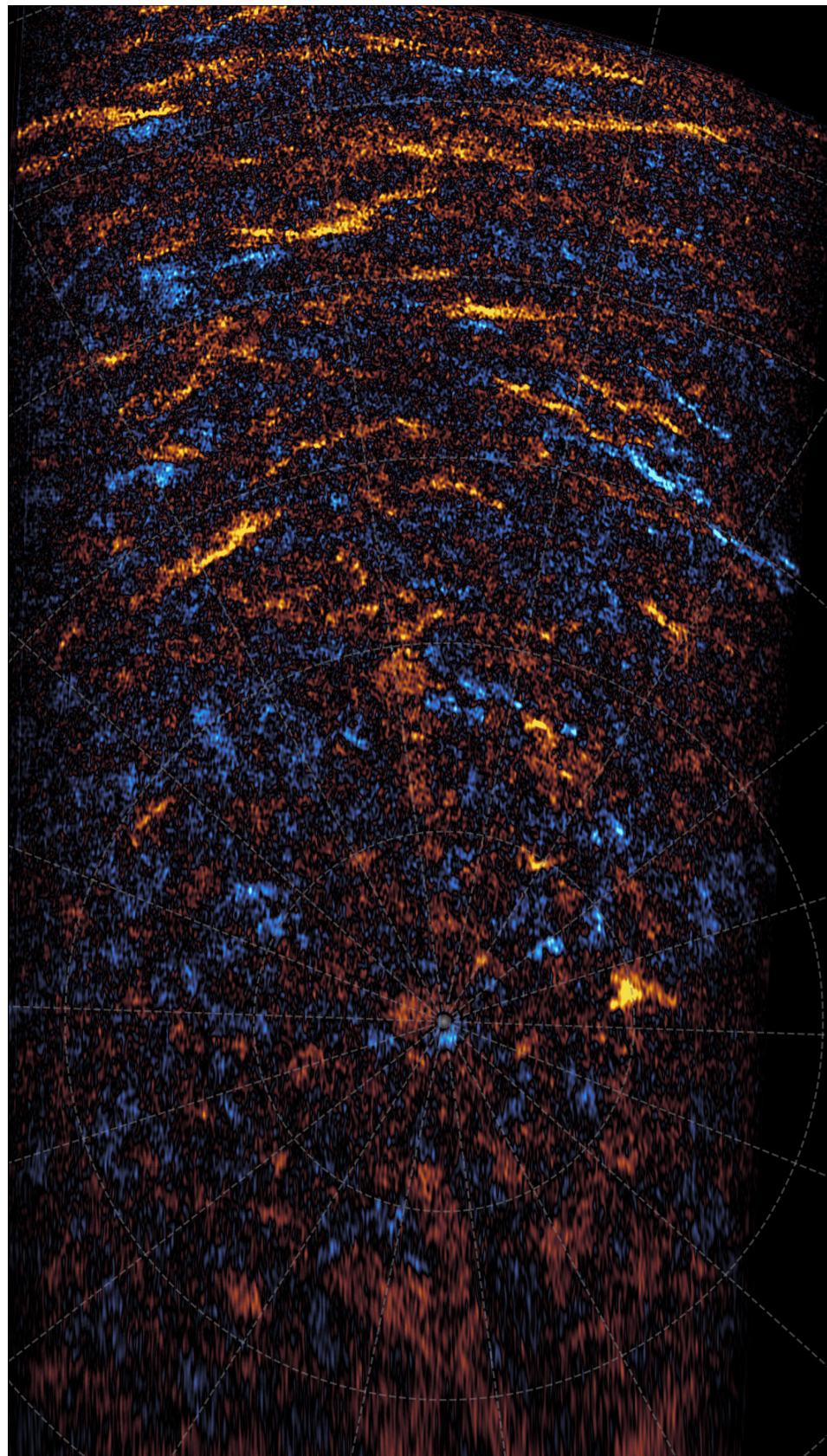


Figura 4. Proyección polar del campo magnético fotosférico en el polo solar, obtenida con el telescopio de alta resolución de SO/PHI durante la campaña de marzo de 2025. Los colores indican la polaridad magnética: los tonos rojizos corresponden a polaridad positiva y los azulados a polaridad negativa. Esta proyección permite visualizar la distribución y complejidad del campo magnético en torno al polo porque corrige la distorsión por el ángulo de observación.

AGRADECIMIENTOS

Solar Orbiter es una misión espacial fruto de la colaboración internacional entre la ESA y la NASA, y operada por la ESA. Agradecemos a los equipos del Science Operations Centre (SOC) y del Mission Operations Centre (MOC) de la ESA por su apoyo. La contribución alemana a SO/PHI está financiada por el Ministerio Federal de Economía y Energía de Alemania (BMWi) a través del Centro Aeroespacial Alemán (DLR) y por fondos centrales de la Sociedad Max Planck (MPG). La contribución española está financiada por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) / Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MCIN) / 10.13039/501100011033, y por la Unión Europea mediante los fondos Next-GenerationEU/PRTR (proyectos RTI2018-096886-C5, PID2021-125325OB-C5, CNS2023-144723, PID2024-156066OB-C5) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), bajo el lema «Una manera de hacer Europa»; así como por las distinciones Centro de Excelencia Severo Ochoa otorgadas al IAA-CSIC (SEV-2017-0709, CEX2021-001131-S) y un contrato Ramón y Cajal concedido a D.O.S.

La contribución francesa está financiada por el CNES.

REFERENCIAS

- [1] Müller, D., St. Cyr, O.C., Zouganelis, I., et al. 2020, *A&A*, 642, A1. doi:10.1051/0004-6361/202038467
- [2] Cameron, R. and Schüssler, M. 2015, *Science*, 347, 6228, 1333. doi:10.1126/science.1261470
- [3] Tsuneta, S., Ichimoto, K., Katsukawa, Y., et al. 2008, *ApJ*, 688, 2, 1374. doi:10.1086/592226
- [4] <https://s3pc.es>
- [5] Calchetti et al. 2025, *A&A*, accepted, arXiv: 2512.03611
- [6] Chitta et al. 2025, *ApJL*, 993, L45

Figura 5. Unidad óptica del instrumento SO/PHI.

