

# SOLAR ORBITER Y LA PARTICIPACIÓN ESPAÑOLA

La misión SOLAR ORBITER (Müller, St. Cyr, Zouganelis, et al. 2020) comenzó su periplo el 10 de febrero de 2020, desde Cabo Cañaveral, en Florida. Un viaje inédito para la humanidad en el que las agencias espaciales europea (ESA, la cual ostenta el liderazgo) y americana (NASA) han colaborado estrechamente cerca de veinte años; un viaje al que le esperan todavía unas cuantas órbitas más: en concreto, dos por año, aproximadamente. SOLAR ORBITER no es el primer ingenio humano en orbitar alrededor del Sol, pero sí el primero en hacerlo con una batería de instrumentos que conjugan el sondeo remoto de la estrella con la medida local de las propiedades del medio interplanetario, el viento solar y las partículas energéticas que atraviesan la nave. Esta característica singular la capacita como una herramienta única para comprender el origen solar de todos los fenómenos y sucesos que tienen lugar en la heliosfera.



Javier Rodríguez-Pacheco  
Universidad de Alcalá  
[fsrodriguez@uah.es](mailto:fsrodriguez@uah.es)



Jose Carlos del Toro Iniesta  
Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC  
[jti@iaa.es](mailto:jti@iaa.es)

SOLAR ORBITER es quizá la primera misión espacial concebida para estudiar la heliosfera como un todo, como un único sistema cuyo “motor central” es el Sol. De hecho, el nudo gordiano que pretende ayudar a desatar corresponde al porqué y al cómo el Sol crea y controla la heliosfera y gobierna los fenómenos que ocurren en ella. Una pregunta con dosis ciertas de antropocentrismo y con notables proyecciones hacia nuestra vida en la Tierra (en el Sistema Solar): casi todo lo que ocurre en nuestro entorno espacial cercano tiene que ver, e incluso cuenta con su origen, en el Sol.

Con un órbita altamente elíptica y excéntrica, la nave tiene un perihelio de 0,3 au y un afelio de 1 au. Ninguna otra nave se ha acercado tanto a nuestra estrella salvo PARKER SOLAR PROBE de la NASA (Fox, Velli, Bale, S. D., et al. 2016), pero ésta sin instrumentos de observación solar remota (salvo una cámara de campo amplio); sólo cuenta con instrumentos de medida local. Con semejante perihelio, SOLAR ORBITER tiene capacidad de ofrecer resoluciones espaciales de la superficie solar que resultan competitivas con las que suministran los telescopios terrenos o en órbita terrestre más potentes. Pero, además, las órbitas se caracterizan por ir inclinándose progresivamente más con respecto al plano de la eclíptica. En sus puntos de máxima y mínima heliolatitud, los instrumentos de sondeo remoto van a tener una visión inédita de los polos, cuya inclinación con respecto a la normal de la eclíptica ( $\leq 7^\circ$ ) impide su observación correcta desde nuestro planeta. Una observación ventajosa de los polos es importante por varias razones, pero, sobre todo, porque los campos magnéticos, fundamentalmente perpendiculares a la superficie solar, se infieren de forma más precisa cuando se los observa longitudinalmente por la especial sensibilidad de las líneas espectrales al efecto Zeeman. Los campos magnéticos polares resultan clave para entender los cambios de polaridad en cada ciclo de actividad de once años. Resultan cruciales, pues, para entender la actividad solar (y, con ésta, la de otras estrellas).

Para España, SOLAR ORBITER tiene connotaciones especiales puesto que es la primera misión del programa científico de la ESA en la que nuestro país ostenta liderazgo en dos instrumentos. El *Energetic Particle Detector* (EPD; Rodríguez-Pacheco, Wimmer-Schweingruber, Mason, et al. 2020), uno de los cuatro instrumentos de medida local, está liderado por Javier Rodríguez-Pacheco, de la Universidad de Alcalá (UAH), y coliderado por Robert Wimmer-Schweingruber, de la Universidad de Kiel. El

*Polarimetric and Helioseismic Imager* (Solanki, Del Toro Iniesta, Woch, et al. 2020) uno de los seis instrumentos de sondeo remoto, está liderado por Sami K. Solanki, del Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, en Gotinga, Alemania, y coliderado por Jose Carlos del Toro Iniesta, del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC). Además, el último jefe de proyecto de la misión hasta su lanzamiento fue también un español: César García Marirrodriga, y su actual jefe de misión es, de nuevo, otro español: Luis Sánchez Duarte. Estos dos últimos trabajan para la ESA. Dejando a un lado las cuestiones personales que pueden resultar anecdóticas, es cierto que nuestro país se ha implicado en un esfuerzo económico considerable, pero que ha resultado en una línea estratégica de desarrollo instrumental y tecnológico de primer orden el cual nos ha situado a los grupos y empresas españolas en la vanguardia internacional.

Coordinados por el IAA-CSIC, en el desarrollo de SO/PHI han participado el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), la Universitat de València (UV), la Universitat de Barcelona (UB), el Instituto “Ignacio da Riva” de la Universidad Politécnica de Madrid (IDR-UPM) y el Instituto de Astrofísica de Canarias. Por su parte, la UAH y, en concreto, dos de sus departamentos, ha sido la contribuyente española a EPD junto con el Instituto “Ignacio da Riva” mencionado anteriormente. Por último, la empresa española SENER Aeroespacial, además de participar significativamente en ambos instrumentos como veremos más abajo, es responsable de todo el sistema de antenas de comunicaciones de la nave, del mástil desplegable que alberga los cuatro instrumentos de medida local, así como de los *pasamuros*, interfaces huecas entre el escudo térmico de la nave y la plataforma principal en las que se albergan las ventanas calorífugas que protegen los instrumentos de sondeo remoto.

### EL ENERGETIC PARTICLE DETECTOR

Para poder responder adecuadamente a las preguntas fundamentales de SOLAR ORBITER, se hace necesario un instrumento que determine las propiedades de las poblaciones de partículas energéticas solares en un amplio rango de energías, desde supratérmicas hasta de cientos de MeV; y además proporcione composiciones tanto elementales como isotópicas e información direccional. No existe ningún instrumento detector de partículas capaz, con una única unidad, de cumplir con todos estos requisitos, y además con aquellos relacionados con estar embarcado en una misión

espacial. Es por este motivo por lo que EPD está formado por varias unidades, cada una de ellas encargada de estudiar una determinada región del espectro de energías y una determinada especie nuclear. Además, el hecho de que la plataforma esté estabilizada en tres ejes, debido a los requisitos observacionales impuestos por los instrumentos de teledetección, hace necesario que a la hora de proporcionar la información direccional requerida para reconstruir funciones de distribución en 3D, la mayor parte de las unidades de EPD consten de varios sensores cada uno de ellos cubriendo un determinado campo de visión. En el consorcio internacional que ha desarrollado EPD han intervenido: el Space Research Group de la Universidad de Alcalá, la Christian-Albrechts-University, Kiel, Alemania y el Applied Physics Laboratory de la Johns Hopkins University de los Estados Unidos de América.

EPD está compuesto por las siguientes unidades:

- STEP: Suprathermal Electrons and Protons
- EPT: Electron and Proton Telescope (dos unidades)
- SIS: Suprathermal Ion Spectrograph (SIS)
- HET: High Energy Telescope (dos unidades)

Todas ellas comparten la Unidad de Control del Instrumento conocida como ICU que, además de servir de unidad central de procesamiento de datos, se encarga del suministro de potencia a las unidades.

La Figura 1 muestra los modelos de vuelo de todas sus unidades durante su integración en las instalaciones de SENER, en Tres Cantos, en julio de 2016.

La masa total de EPD es de 14,7 kg y su consumo promedio de potencia es de 21 W. Las pruebas realizadas durante la fase de crucero indican que EPD está funcionando perfectamente cumpliendo las previsiones realizadas durante su desarrollo (Prieto Mateo et al. 2021).

Todos los sensores de EPD contienen detectores de estado sólido y se basan en el hecho de que la energía de las partículas es proporcional a la carga depositada en los detectores cuando estas se detienen. La identificación entre electrones e iones se realiza gracias al uso de imanes (como en STEP y EPT) y la identificación de las distintas especies nucleares se logra combinando técnicas de “time of flight” (SIS) como el uso de detectores de estado sólido en configuración telescópica (HET). El rango de energías cubierto por cada uno de los sensores puede verse en el

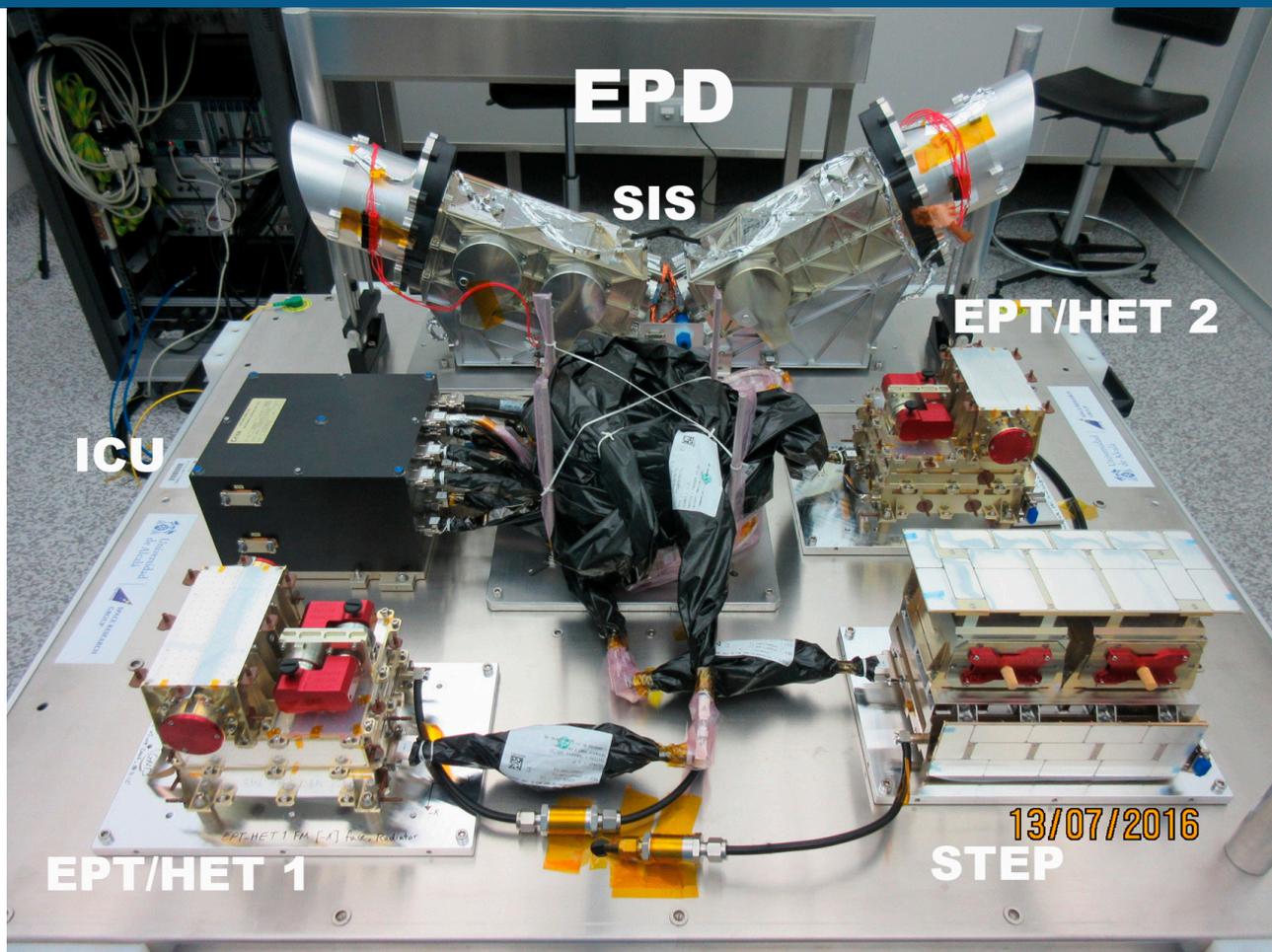
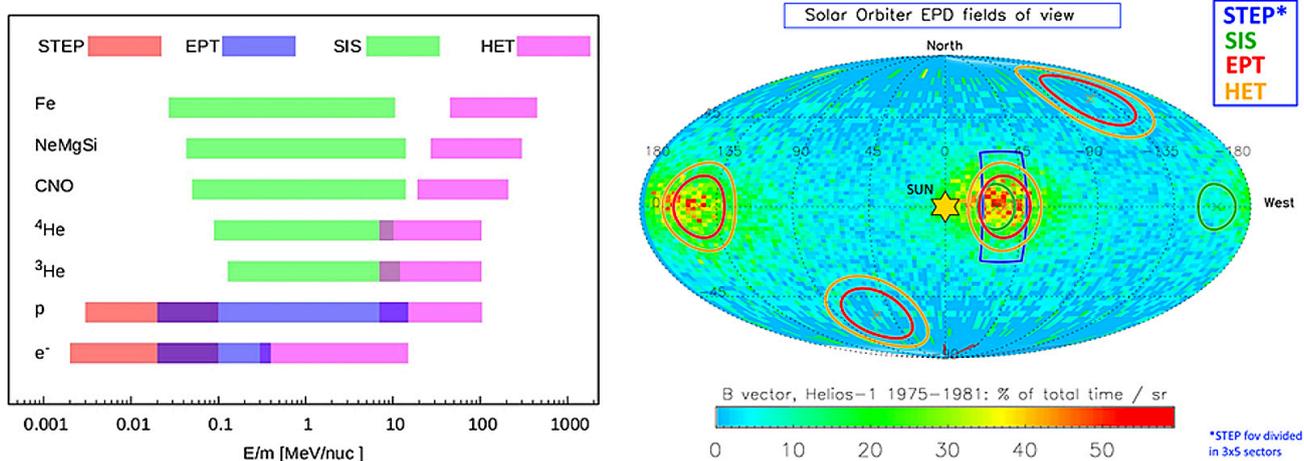


Figura 1. Modelo de vuelo de EPD durante las pruebas de integración (Rodríguez-Pacheco et al., 2021).

Figura 2. Rango energético cubierto por EPD (izquierda) y campos de visión de los distintos sensores. Nótese la acumulación alrededor de la zona de mayor probabilidad de encontrar el campo magnético interplanetario a 0,28 au. Figura adaptada de Rodríguez-Pacheco et al., 2021.



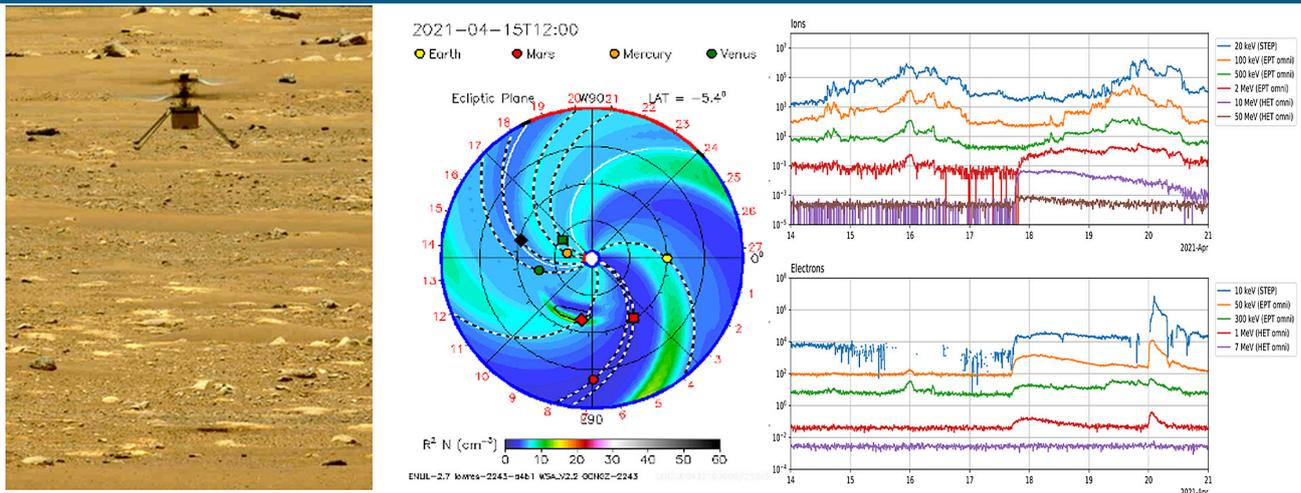


Figura 3. Segundo vuelo del INGENUITY sobre la superficie marciana (izquierda). Predicción del modelo ENLIL de la propagación asociada a la CME del 14 de abril de 2021 (centro) y flujos de iones y electrones de diversas energías medidos por EPD en el momento de la llegada de la onda de choque asociada a la CME (derecha). Créditos: NASA, WSA-Enlil Solar Wind Prediction y EPD/Solar Orbiter.

panel de la izquierda de la Figura 2. El panel derecho de esta misma figura muestra los distintos campos de visión de los sensores de EPD. El Sol se encuentra en el centro, marcado por una estrella amarilla de seis puntas, mientras que los colores más rojizos del fondo indican mayor probabilidad de encontrar el campo magnético a 0,3 au (y por tanto mayor probabilidad de llegada de las partículas cargadas).

### LA CONTRIBUCIÓN ESPAÑOLA A EPD

A nivel institucional, la contribución española ha estado a cargo del Grupo de Investigación Espacial de la Universidad de Alcalá (SRG-UAH) y del Instituto “Ignacio da Riva” de la Universidad Politécnica de Madrid (IDR-UPM).

El grupo SRG-UAH se ha encargado de la coordinación de todo el desarrollo del instrumento EPD a través de la oficina de proyecto, así como del desarrollo de la Instrument Control Unit (ICU) de EPD incluyendo el desarrollo y verificación de su *software* de vuelo y del *firmware* de la FPGA. La oficina de proyecto se ha encargado de la ingeniería de sistemas, control de configuración, análisis estructural y térmico (a nivel instrumento) y del ensamblado, verificación, integración y cotejo (AIVT de sus siglas en inglés) del instrumento. Por su parte, la ICU es el único punto de conexión entre la nave y todas las unidades de EPD, sirviendo de interfaz tanto de datos como de potencia. La ICU está compuesta por la Common Data Processing Unit (CDPU) y la Low Voltage Power Supply (LVPS). Además, la ICU está encargada de activar los modos ráfaga tras la identificación a bordo de determinados sucesos en

los datos de EPD y de compartir esta información con otros instrumentos de la misión para activar, si fuese el caso, los modos ráfaga coordinados que han sido planeados durante el desarrollo de la misión.

Sus principales funciones son:

- Monitorizar y controlar de los sensores.
- Asignación de tiempos.
- Recolección, comprensión y empaquetado de los datos de EPD para su posterior telemetría a Tierra.
- Recepción y transmisión a los sensores de los telecomandos recibidos por la nave.

El diseño de la ICU se basa en la unidad Common Data Processing Unit (CDPU) de los instrumentos Comprehensive Suprathermal and Energetic Particle Analyzer “COSTEP” y de Energetic and Relativistic Nuclei and Electron “ERNE” a bordo de la misión SOHO de la ESA/NASA. Ha de destacarse que, con más de 27 años de operaciones en el espacio, la CDPU no ha sufrido ningún contratiempo, funcionando la unidad nominal de forma continuada salvo por las interrupciones asociadas a la propia misión. Este hecho puede dar una idea de la enorme fiabilidad que tienen las unidades desarrolladas por nuestro grupo.

Por su parte, el IDR-UPM estuvo a cargo de todo el diseño y el *hardware* térmico de todas las unidades de EPD. El grupo SRG-UAH al ser la entidad que acoge al Investigador Principal del instrumento, también es responsable en la actualidad de todos los procedimientos de operaciones del instrumento, así como de suministrar a la ESA todos los datos de

EPD, desde los datos nivel cero, hasta los datos de las medidas expresados en unidades físicas (L2).

La contribución de la industria española del sector se ha concentrado en las empresas SENER Aeroespacial y CRISA/AIRBUS. SENER ha dado soporte en todo momento a la oficina de proyecto, principalmente las actividades relacionadas con ingeniería de sistemas, así como del cableado del instrumento y la garantía de producto (PA). Por su parte CRISA/AIRBUS se ha encargado del diseño de la LVPS y de la fabricación del modelo de vuelo de la ICU.

### PRIMEROS RESULTADOS DE EPD

La fase de crucero de la misión duró desde junio de 2020 a noviembre de 2021. Durante ese periodo se han realizado numerosas mediciones, particularmente de instrumentos *in situ*, cuyos resultados se publicaron en un número especial de la revista *Astronomy & Astrophysics*. Los trabajos publicados que hicieron uso de los datos de EPD se muestran en la Tabla 1. Como puede observarse, los temas cubiertos se refieren principalmente al campo de las partículas energéticas, pero los datos de EPD también han sido

cruciales para el estudio de la magnetosfera de Venus (tan distinta en origen a la terrestre, pero con algunas características similares tal y como observó EPD) o en las propiedades físicas de la cola de un cometa como fue el cruce de la cola del cometa Atlas en junio de 2021. De más de medio centenar de artículos publicados en este número, 16 usaron datos de EPD, es decir, puede afirmarse que casi uno de cada 3 artículos publicados utilizó los datos de nuestro instrumento. Además cabe destacar que el artículo de [Mason et al. \(2021\)](#), sobre sucesos ricos en He-3, fue el primer artículo con resultados científicos que fue aceptado para publicación de toda la misión SOLAR ORBITER.

No obstante, la posibilidad de correlacionar las medidas remotas con las *in situ* y, además, discernir los efectos espaciales (distinta conexión magnética con la fuente en el Sol) y temporales (variaciones temporales de la propia fuente de partículas energéticas) solo es posible cuando la nave se encuentra a distancias del orden de 0,3 au, cosa que ocurrió en marzo de 2022 durante el primer perihelio por debajo de 0,4 au. En el momento de escribir este artículo, estamos preparando las publicaciones para el

Tabla 1. Artículos del número especial de A&A que hicieron uso de EPS.

Tema	Título	Autores	doi
Sol/Partículas Energéticas	3He-rich solar energetic particle events observed on the first perihelion pass of Solar Orbiter	G. M. Mason et al.	<a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039752">https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039752</a>
	Suprathermal particles from corotating interaction regions during the first perihelion pass of Solar Orbiter	R. C. Allen et al.	<a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039870">https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039870</a>
	First near-relativistic solar electron events observed by EPD onboard Solar Orbiter	R. Gómez-Herrero et al.	<a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039883">https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039883</a>
	Quiet-time low energy ion spectra observed on Solar Orbiter during solar minimum	G. M. Mason et al.	<a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140540">https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140540</a>
	The long period of 3He-rich solar energetic particles measured by Solar Orbiter 2020 November 17–23	R. Bučík et al.	<a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141009">https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141009</a>
	Solar energetic particle heavy ion properties in the widespread event of 2020 November 29	G. M. Mason et al.	<a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141310">https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141310</a>
	The first widespread solar energetic particle event observed by Solar Orbiter on 2020 November 29	A. Kollhoff et al.	<a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140937">https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140937</a>
First year of energetic particle measurements in the inner heliosphere with Solar Orbiter's Energetic Particle Detector	R. F. Wimmer-Schweingruber et al.	<a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140940">https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140940</a>	
Sol/Emissiones Solares de Masa	Solar origins of a strong stealth CME detected by Solar Orbiter	J. O'Kane et al.	<a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140622">https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140622</a>
	Study of two interacting interplanetary coronal mass ejections encountered by Solar Orbiter during its first perihelion passage	D. Telloni et al.	<a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140648">https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140648</a>
	Multi-spacecraft observations of the structure of the sheath of an interplanetary coronal mass ejection and related energetic ion enhancement	E. K. J. Kilpua et al.	<a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140838">https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140838</a>
	Radial evolution of the April 2020 stealth coronal mass ejection between 0.8 and 1 au	Johan L. Freiherr von Forstner et al.	<a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039848">https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039848</a>
Medio Interplanetario /Partículas Energéticas	Evidence for local particle acceleration in the first recurrent galactic cosmic ray depression observed by Solar Orbiter	A. Aran et al.	<a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140966">https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140966</a>
	Cosmic-ray flux predictions and observations for and with Metis on board Solar Orbiter	C. Grimani et al.	<a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140930">https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140930</a>
Venus	Energetic ions in the Venusian system: Insights from the first Solar Orbiter flyby	R. C. Allen et al.	<a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140803">https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140803</a>
Cometa Atlas	Solar Orbiter's encounter with the tail of comet C/2019 Y4 (ATLAS): Magnetic field draping and cometary pick-up ion waves	L. Matteini et al.	<a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141229">https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141229</a>

segundo número de *Astronomy & Astrophysics* basado en datos de este perihelio. Podemos entonces afirmar que lo mejor está aún por venir.

Por último, es necesario comentar que además de sus contribuciones científicas, EPD tiene también una relevancia particular respecto de los temas de Meteorología Espacial. Concretamente, el 17 de abril de 2021, dos días antes del primer vuelo del helicóptero *INGENUITY* sobre la superficie de Marte, una eyección coronal de masa (CME) fue expulsada desde el Sol en dirección a Marte. Los modelos desarrollados por NASA predecían la llegada de la CME a Marte (y de la posible radiación de alta energía asociada) el 22 de ese mismo mes, comprometiendo de esta forma el segundo vuelo del *INGENUITY*. Dado que *SOLAR ORBITER*, y en concreto EPD, se encontraba justo en el camino de la CME, nuestro equipo fue contactado por NASA para evaluar el riesgo de radiación de alta energía. Riesgo que resultó ser bajo y por tanto el *INGENUITY* pudo realizar su segundo vuelo sin ningún contratiempo. La Figura 3 muestra el dron *INGENUITY* a la izquierda, la predicción del modelo ENLIL en el panel central con Marte y *SOLAR ORBITER* representados con un círculo y un rombo rojo respectivamente en el momento del impacto de la CME sobre la nave y los datos de iones y electrones medidos por EPD durante ese periodo.

### LAS MEDIDAS DEL POLARIMETRIC AND HELIOSEISMIC IMAGER

SO/PHI es un complejo instrumento dedicado a proporcionar imágenes del vector campo magnético,  $\mathbf{B}$ , y de la velocidad a lo largo de la línea de visión,  $v_{\text{LOS}}$  de la fotosfera solar. De hecho, puede calificarse como el primer magnetógrafo y tacógrafo de la historia *stricto sensu*, aunque otros precursores hayan utilizado el calificativo de magnetógrafos. Esto es así porque SO/PHI es el primer instrumento de la historia capaz de producir autónomamente esos mapas de  $\mathbf{B}$  y  $v_{\text{LOS}}$ . Entenderemos enseguida por qué.

Para proporcionar imágenes, PHI incorpora sus propios telescopios: en concreto, dos, uno que forma imagen del disco entero (el *full disk telescope* o FDT) y otro que lo hace de una pequeña zona de la superficie solar (el *high resolution telescope* o HRT). Ambos telescopios se alternan para dirigir la luz a un camino óptico único y común para ambos. Para preservar la resolución espacial del HRT y no depender de la insuficiente puntería proporcionada por la nave, el instrumento cuenta con un seguidor

por correlación que actúa sobre un espejo ágil en tiempo real a fin de corregir los efectos de las vibraciones residuales.

Para inferir  $v_{\text{LOS}}$ , obviamente, SO/PHI debe hacer espectroscopía para utilizar el efecto Doppler. La hace mediante un interferómetro Fabry-Pérot cuyo perfil de transmisión tiene una anchura a media altura de  $10,6 \pm 0,5$  pm. Así pues, con imágenes casi monocromáticas, se barre secuencialmente la línea en hasta cinco longitudes de onda con un paso de 7 pm más otra en el continuo adyacente a 30 pm del centro de la línea de Fe I a 617,3 nm.

En realidad, para medir la velocidad bastaría con un par de muestras en longitud de onda. La toma de 6 muestras obedece a que, para inferir  $B$  debemos acudir al efecto Zeeman en las líneas espectrales. El campo magnético no sólo desdobra las líneas en componentes separadas en longitud de onda, sino que también modifica el estado de polarización de dichas componentes. Debemos medir el perfil de los cuatro parámetros de Stokes de la línea espectral. Por tanto, SO/PHI también debe ser un polarímetro preciso. De hecho, la sensibilidad necesaria para inferir los débiles campos magnéticos que pueblan las regiones menos activas del Sol es de  $10^{-3}$ . Específicamente, el ruido en los perfiles de los parámetros de Stokes  $Q$ ,  $U$ , y  $V$  ha de ser  $10^{-3} I_c$ , donde  $I_c$  es la intensidad en el continuo. SO/PHI realiza el análisis polarimétrico mediante el uso de sendos paquetes de polarización (PMP), uno por telescopio y anteriores al interferómetro Fabry-Pérot.

El instrumento toma conjuntos básicos de 24 imágenes de  $2048 \times 2048$  px<sup>2</sup>, correspondientes a 6 longitudes de onda y 4 estados de polarización, en un tiempo de 1 minuto. Hasta aquí se puede comprender que PHI hace a la vez todo lo que cualquier instrumento astronómico puede realizar: toma imágenes (limitadas por difracción), es un espectrómetro de alta resolución y un polarímetro de gran sensibilidad. Pero, por si esto fuera poco, todos esos datos brutos no se pueden enviar regularmente a la Tierra porque *SOLAR ORBITER* es una misión de espacio profundo: la nave se encuentra demasiado lejos durante la mayor parte de la órbita. De hecho, hay veces que nuestro planeta y el Sol están en conjunción vistos de la nave: los instrumentos a bordo ven la cara que no vemos desde casa. No hay capacidades telemétricas suficientes y SO/PHI, entonces, envía sólo 5 imágenes en lugar de las 24 originales: una de  $I_c$  que sirve de contexto, una por cada una de

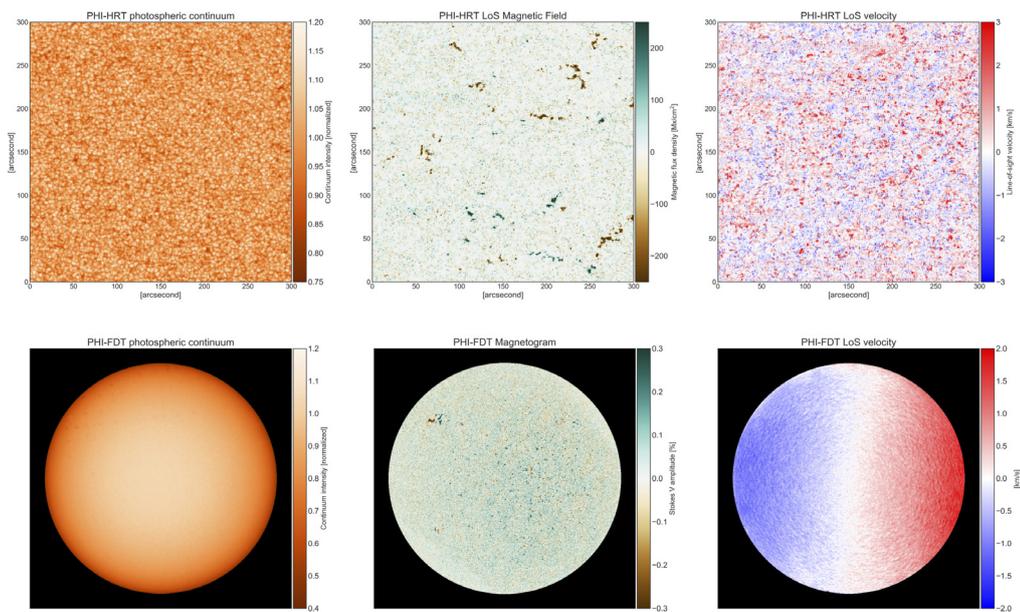


Figura 4. Imágenes de continuo (columna izquierda) y primeros magnetogramas (columna central) y tacogramas (columna derecha) obtenidos autónomamente a bordo de la nave cuando la distancia al Sol era de 0,5 au. Fila superior: imágenes provenientes del HRT; fila inferior: imágenes provenientes del FDT. Cortesía del equipo de SO/PHI.

las componentes del vector  $\mathbf{B}$  y otra de  $v_{\text{LOS}}$ . Para ello, debe obtener en vuelo estos parámetros físicos de la atmósfera solar mediante la inversión de la ecuación (vectorial) de transporte radiativo para luz polarizada.

**LA CONTRIBUCIÓN ESPAÑOLA A PHI**

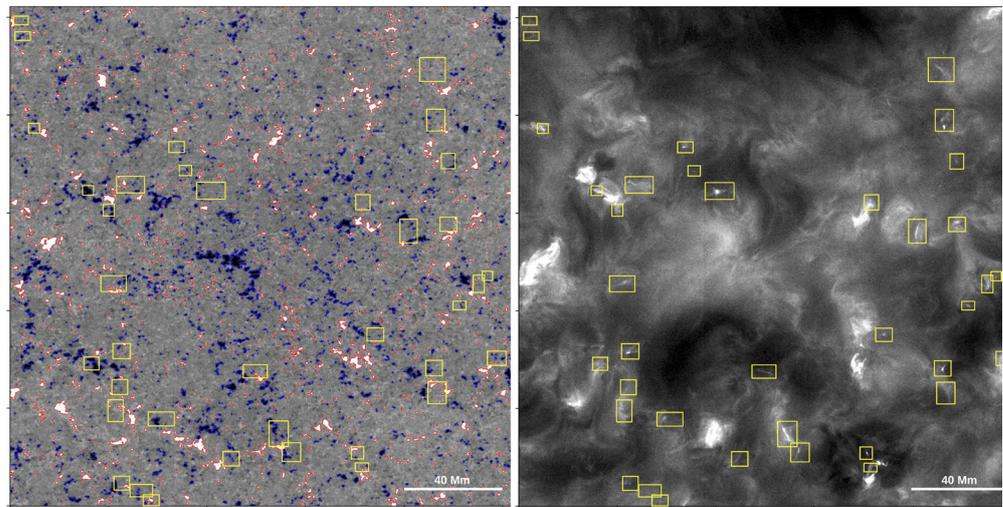
Los interferómetros Fabry-Pérot más usados en astronomía constan de cavidades de aire entre vidrios plano-paralelos que han de moverse y son muy pesados. Tanto, que no podrían volar en esta misión con requisitos tan extremos de masa y potencia. Lo mismo ocurre con los polarímetros clásicos: se basan en el uso de láminas rotantes que, consiguientemente, necesitan motores que introducen ruido y efectos nocivos como el cabeceo del eje óptico de la imagen. Por último, nadie ha invertido la ecuación de transporte radiativo de forma autónoma y, menos, a bordo de una nave espacial.

El equipo de INTA se ha encargado de la cualificación para su uso espacial de los etalones sólidos de  $\text{LiNbO}_3$ . Estos dispositivos electroópticos sustituyen con alto voltaje el movimiento de las placas de los tradicionales para realizar la sintonización de las distintas muestras de longitud de onda. Están volando por primera vez en el espacio. Pero es que el mismo equipo del INTA ha desarrollado unos PMP basados en retardadores ópticos de cristal líquido que sustituyen a las láminas rotantes, de nuevo, con dispositivos electroópticos. Vuelan en SO/PHI también por primera vez. Por último, el equipo del IAA-CSIC ha desarrollado un inversor electrónico de la ecuación de transporte radiativo: una matriz de puertas lógicas programable en campo (un *chip*) especialmente diseñado para realizar de forma intensiva en media hora a bordo de la nave, y consumiendo tan sólo

~ 5 W, lo que hacen 50 CPU en Tierra, consumiendo cientos de W. Este dispositivo es el primero de su especie. No existen equivalentes ni para su uso terreno.

Hasta aquí las innovaciones tecnológicas españolas que, como se comprende fácilmente, son clave para el cumplimiento de los objetivos de PHI. Pero las aportaciones han ido más allá. De hecho, el propio concepto de instrumento hereda mucho de IMaX (*Imaging Magnetograph eXperiment*; Martínez Pillet, Del Toro Iniesta, Álvarez-Herrero et al. 2011), instrumento desarrollado por el mismo consorcio, el hoy denominado Spanish Space Solar Physics Consortium (S<sup>3</sup>PC). IMaX fue desarrollado para la misión estratosférica SUNRISE y sirvió de banco de pruebas y demostración para el uso espacial de las dos primeras tecnologías. La tercera simplemente hereda el conocimiento destacado de la escuela española de espectropolarimetría. El INTA desarrolló el telescopio FDT además de los PMP. La UB desarrolló la electrónica del sistema estabilizador de imagen. El IDR-UPM estuvo a cargo de todo el diseño y el *hardware* térmico del instrumento, así como del análisis de estructuras de la unidad electrónica (E-Unit). Además de primer coordinador del equipo español, el IAC fue responsable del sistema de compresión de datos (que se ejecuta en el mismo chip que el inversor). La UV desarrolló el módulo redundante convertidor de potencia, la mecánica de la E-Unit y un potente simulador del instrumento en su conjunto (SOPHISM; Blanco Rodríguez, Del Toro Iniesta, Orozco Suárez et al. 2018), que, de hecho, es virtualmente generalizable con facilidad a cualquier otro instrumento, no únicamente solar. Por último, el IAA-CSIC, además del inversor, fue responsable del conjunto de la E-Unit y el cableado del

Figura 5. Distribución de las “fogatas” superpuesta a los magnetogramas de SO/PHI (izquierda) e identificadas en la imagen en el ultravioleta extremo proporcionada por EUI (derecha). Los contornos rojos (positivos) y azules (negativos) contienen campos longitudinales  $|B_{LOS}| \geq 21$  G (3 veces el ruido). Las cajas amarillas encierran las zonas donde se encuentran los abrillantamientos calificados como fogatas. El magnetograma está saturado a  $\pm 40$  G. La escala de tamaños está indicada en la parte inferior derecha de las imágenes. Tomada de Kahil, Hirzberger, Solanki et al. 2022, A&A 660, A143.



instrumento. Dentro de la E-Unit, desarrolló la tarjeta de control analógico de mecanismos y calentadores, así como el sistema de distribución eléctrica.

Como es fácil de imaginar, la participación industrial también ha sido intensa. La empresa SENER Aeroespacial ha fabricado los modelos de cualificación, de vuelo y de repuesto de la E-Unit, ALTER Technology (española con capital europeo) se ha encargado del aprovisionamiento de componentes cualificados para el vuelo de los 10 instrumentos científicos, CASA División Espacio (ADS) ha fabricado el *hardware* térmico de SO/PHI, Axon (francesa con delegación en España) ha fabricado los cables de vuelo y de repuesto, Arcoptix (suiza) ha fabricado los retardadores ópticos de cristal líquido para los PMP, Activa-Norinstal ha contribuido al diseño óptico y C.A. Asociados ha fabricado la mecánica y optomecánica de la contribución española al banco óptico de vuelo.

La labor del IAA-CSIC como institución coinvestigadora principal, además de la construcción del instrumento en sí ha estado en la corresponsabilidad del diseño científico y de las operaciones del instrumento, así como en la participación en numerosos comités de la misión.

### PRIMEROS RESULTADOS DE SO/PHI

A diferencia de los instrumentos de medida local, como EPD, los de sondeo remoto comenzaron su fase científica en noviembre de 2021. Durante la fase previa de cruce, tuvieron determinadas *ventanas* en las que poder cotejar el funcionamiento de los instrumentos y comprobar su estado en los distintos escenarios cambiantes

a lo largo de la órbita. Durante la fase científica, estos instrumentos, y SO/PHI con ellos, sólo observan de forma intensiva en tres ventanas de diez días por órbita, coincidentes con el perihelio y la máxima y mínima heliolatitudes. El resto del tiempo, instrumentos como SO/PHI vigilan el estado del Sol con una cadencia tan sólo de entre 6 horas y varios días. Además de la escasez de tiempo y la complejidad del instrumento que aún necesita algunas puestas a punto, PHI ha proporcionado datos inéditos y muy interesantes resultados. Por ejemplo, hemos obtenido los primeros magnetogramas y taquogramas autónomos de la historia (véase la Figura 4). También hemos observado el campo magnético de la cara del Sol que no vemos desde Tierra lo cual tiene una gran trascendencia para progresar en nuestro conocimiento del tiempo espacial. De hecho, con las observaciones heliosismológicas terrenas o en órbita terrestre, somos capaces de predecir la actividad en esa cara trasera de nuestra estrella. Hasta ahora, sin embargo, no habíamos sido capaces de corroborar dichas predicciones, que resultan fundamentales para prevenir los eventuales fenómenos solares con influencia directa en la atmósfera de nuestro planeta (Strecker, Jain, Orozco Suárez et al. 2023, en preparación). Las observaciones del campo magnético de la cara trasera también nos permiten realizar estudios evolutivos de regiones activas a largo plazo (Strecker, Moreno Vacas, Orozco Suárez et al. 2023, en preparación) combinándolas con observaciones desde Tierra. También hemos podido estudiar el origen magnético (Kahil, Hirzberger, Solanki et al. 2022, A&A 660, A143) de las llamadas “fogatas” solares, fulguraciones a muy pequeña escala (véase la Figura 5), descubiertas por el Extreme Ultraviolet Imager (EUI), otro de los instrumentos a bordo de SOLAR ORBITER.