

R

Nord 9

£

DR

A

MALE

R

a.

10181

89

3

.

.

No al

9

 $O \leq O$

Sociedad Española de Astronomía

Comisión Mujer y Astronomía - 11 febrero 2018 Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia

1

Portada: Detalle del póster creado para el Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia, 11 de febrero de 2018, con un mosaico de astrónomas españolas conformando una impresión artística de la Vía Láctea. Créditos: Silvia Martínez y Maite Ceballos en nombre

de la Comisión Mujer y Astronomía de la SEA. NASA (por la imagen original de la galaxia).

Comité editorial: Manuel Collados Nuria Huélamo José María Diego Marc Ribó Íñigo Arregui Uribe-Echevarría Fernando J. Ballesteros Roselló Amelia Ortiz Gil

Maquetación: Fernando J. Ballesteros Roselló

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

CONTENIDOS





5 Editorial

- 6 Actividades de la SEA para el 11 de febrero, Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia
- 8 Primeros datos públicos de J-PLUS
- 12 Reuniones científicas de la RIA
- 22 Dosier: Física Solar del siglo XXI
- 60 Ecos de (la) Sociedad
- 61 Libros
- 62 Tesis doctorales





EDITORIAL

Se nos acaba 2018 y tenemos de nuevo el placer de presentaros el último Boletín, correspondiente al solsticio de Invierno. Después de tres años y medio coordinando la elaboración de dos ediciones anuales, nuestro compañero Antxon Alberdi lo deja y me pasa el testigo. Gracias, Antxon, por un trabajo tan bien hecho y por dejar la elaboración del Boletín tan bien encarrilada.

El pasado Julio celebramos la XIII Reunión Científica de la SEA, en la que pudimos comprobar la cantidad de resultados novedosos y de ideas y proyectos interesantes que están apareciendo. Debemos felicitarnos por el ímpetu que tiene nuestra comunidad para iniciar y llevar a cabo nuevos desarrollos.

En este Boletín, José Carlos del Toro y yo mismo presentamos un artículo relativamente extenso sobre lo que consideramos, de manera subjetiva, el estado de la Física Solar del siglo XXI. Tras repasar la breve historia de esta rama de la astronomía en nuestro país y los instrumentos actuales más importantes y exitosos, describimos los proyectos instrumentales más importantes en los que está participando nuestra comunidad (Solar Orbiter, Sunrise III y EST) y las sinergias derivadas de su uso combinado y complementario.

En cuanto al resto de contenidos de este número de la revista, Mercedes Molla nos reseña las actividades que ha desarrollado la SEA, a través de su comisión "Mujer y Astronomía", en relación al 11 de Febrero, proclamado por la ONU como Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia. La postal que acompaña al artículo, parte de la cual ocupa la portada de este Boletín, nos recuerda la importancia de las mujeres de nuestro colectivo.

Carlos López San Juan nos explica los detalles de los primeros datos de la colaboración J-PLUS hechos públicos. La base de datos incluye información en 12 filtros ópticos de una gran diversidad de objetos (con millones de estrellas y galaxias).

Igualmente, hacemos mención a las tres reuniones organizadas por la RIA. Víctor Sanchez Béjar, M^a Rosa Zapatero Osorio y Almudena Prieto nos cuentan la reunión sobre FRI-DA y GTC-AO que tuvo lugar en Madrid, en la que se discutieron casos científicos para los que la óptica adaptativa en un gran telescopio como GTC es fundamental. Miguel Mas nos da los detalles de la última reunión RIA-SpaceTec sobre instrumentación astronómica en España, que también se celebró en Madrid. Y Carlos Hernández Monteagudo nos descubre los secretos del Universo Oscuro que discutieron en la que reunión que mantuvieron en Zaragoza.

El Boletín se completa con el clásico resumen de las tesis doctorales más recientes (que nos trae por última vez lñigo Arregui; gracias, lñigo, por tu trabajo de todos estos años), los ecos de sociedad que nos reseña Amelia Ortiz, con las novedades más relevantes ocurridas en nuestra comunidad en este último semestre y el resumen, siempre interesante, de un libro que nos trae Enric Marco, en este caso de "El ojo desnudo" de Antonio Martínez Ron.

Sin más, esperando que os resulte interesante este Boletín, os deseamos unas felices fiestas y que el nuevo año 2019 os traiga a todos todo lo mejor.

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

En la actualidad, las mujeres y niñas encuentran barreras de muchos tipos, a veces muy sutiles, que dificultan su presencia en la ciencia. Esta desigualdad es patente en la elección de los estudios por parte de las niñas y se va agudizando al avanzar en las carreras científicas y tecnológicas. Con el objetivo de lograr el acceso y la participación plena y equitativa en la ciencia para las mujeres y las niñas, la igualdad de género y el empoderamiento de las mujeres y las niñas, el 15 de diciembre de 2015 la Asamblea General de las Naciones Unidas proclamó el 11 de febrero de cada año como el Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia¹.



Mercedes Molla CIEMAT mercedes.molla@ciemat.es

La declaración de la ONU dice así: "Las Naciones Unidas invita a todos los Estados Miembros, todas las organizaciones y los órganos del sistema de las Naciones Unidas y otras organizaciones internacionales y regionales, el sector privado y el mundo académico, así como a la sociedad civil, incluidas las organizaciones no gubernamentales y los particulares, a que celebren el Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia de manera apropiada, en particular a través de actividades de educación y sensibilización pública a fin de promover la participación plena y en condiciones de igualdad de las mujeres y las niñas en la educación, la capacitación, el empleo y los procesos de adopción de decisiones en la ciencia, eliminar toda forma de discriminación contra la mujer, incluso en las esferas de la educación y el empleo, y sortear las barreras jurídicas, económicas, sociales y culturales al respecto mediante, entre otras cosas, la promoción del establecimiento de políticas y planes de estudio en el campo de la ciencia, incluidos programas escolares, según corresponda, para alentar una mayor participación de las mujeres y las niñas, promover las perspectivas de carrera de las mujeres en la ciencia y reconocer los logros de las mujeres en la ciencia."

El talento, la curiosidad y la inquietud científica no son patrimonio de ningún género, por lo que hay que lograr el acceso y la participación plena y equitativa en la ciencia para las mujeres y las niñas. La sociedad española de astronomía, través de su comisión de Mujer y Astronomía, tiene entre sus objetivos visibilizar el trabajo de las astrónomas en nuestro país, así como potenciar las vocaciones hacia la Astrofísica entre las niñas y las mujeres más jóvenes, por lo que ha participado en la celebración del 11 de febrero en el año que acaba y tiene asimismo previstas una serie de actividades para febrero de 2019.

Las actividades realizadas en febrero de 2018 fueron básicamente dos: 1) la realización de un panel astronómico que muestra una composición artística de la Vía Láctea producida por NASA realizado con 106 fotografías de astrónomas españolas o que trabajan en España. Este panel se muestra también en portada y es nuestra aportación como felicitación de la SEA del solsticio de invierno de este año; 2) la realización de la jornada virtual "Charla con una astrónoma" el día 7 de febrero. Durante todo el día, desde las 8 de la mañana a las 12 de la noche sin interrupción,

DÍA INTERNACIONAL DE LA MUJER Y LA NIÑA EN CIENCIA



Sociedad Española de Astronomía - Comisión Mujer y Astronomía Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia 11 febrero 2018



28 voluntarias se prestaron a estar disponibles en red para charlar con toda persona que quisiera preguntar sobre temas astronómicos, así como también de vocaciones, carrera científica, posibles problemas de género, conciliación del trabajo científico y un largo etcétera. Contestamos más de 500 chats, atendiendo a personas de todas las edades e intereses. La experiencia fue muy positiva por parte de los usuarios y también para las propias investigadoras.

En el próximo febrero de 2019 nuestra lista de actividades previstas se ha ampliado:

- Repetiremos la jornada virtual, esta vez llamada "Chatea con una astrónoma", que perfeccionaremos a la vista de nuestra experiencia pasada. Este año seremos más astrónomas en cada slot temporal de modo que reduzcamos el posible tiempo de espera. Además, cada persona interesada o grupo rellenará un pequeño cuestionario anónimo para que podamos hacer algunas estadísticas de la actividad.
- 2) Incluiremos fotos de astrónomas en la web de la SEA durante todo el mes de febrero y hasta el 5 de marzo (ver actividad 4). La idea es que en el banner haya de tres a seis fotos de astrónomas que vayan pasando cuando se pinche en nuestra web http://sea-astronomia.es.

- 3) Hemos convocado un concurso de dibujo para escolares, edades entre 4 y 15 años, con el tema Mujer y Astronomía. Los dibujos podrán ser enviados individualmente o en grupo por parte de los profesores de los colegios hasta el mismo día 11 de febrero. Los trabajos serán evaluados por la propia comisión Mujer y Astronomía, asesorada por dos expertos externos, y el fallo será comunicado el 5 de marzo (probablemente durante la jornada en Valencia, ver siguiente actividad).
- 4) Organización de una Jornada de Género "Mujer y Astronomía" en colaboración con la Universidad de Valencia el 5 de marzo de 2019. Ya están contactadas dos ponentes para dar charlas al público los días 4 y 5 de marzo. Para la jornada de género en si se espera contar con ponentes con experiencia en la problemática de género en la ciencia y la investigación.
- 5) Repetición del panel de astrónomas: el panel realizado este año constaba de 106 fotos, nuestra intención es añadir más fotos de nuestras colegas incrementando el número por encima de 150 para nuestra próxima versión del 2019.

NOTA

- 1 https://11defebrero.org
 - www.un.org/es/events/women-and-girls-in-science-day

Los primeros 1022 grados cuadrados del cielo observados por el proyecto J-PLUS (Javalambre Photometric Local Universe Survey) se hicieron públicos a la comunidad internacional en Salamanca durante la XIII Reunión Científica de la SEA. Gracias a su conjunto de 12 filtros ópticos, cinco anchos y siete estrechos, la DR1 de J-PLUS proporciona información espectral relevante para una gran variedad de casos científicos, desde cuerpos menores del Sistema Solar hasta los cuásares más lejanos, pasando por las estrellas de la Vía Láctea y las galaxias del Universo Local. Presentamos en esta comunicación un breve resumen de las características de este primer conjunto de datos.



Carlos López San Juan En representación de la colaboración J-PLUS Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón *clsj@cefca.es*

A principios del siglo XXI comienza sus operaciones el Sloan Digital Sky Survey (SDSS). El gran impacto de este cartografiado fotométrico y espectroscópico en la Astrofísica actual está fuera de toda duda, demostrando el tremendo potencial de mapear grandes áreas del cielo en busca tanto de fenómenos estadísticos como de objetos escasos.

Otros observatorios han centrado desde entonces, o centrarán en el futuro, su actividad en la realización de cartografiados de grandes porciones del cielo. Algunos obtienen imágenes muy profundas con un conjunto de filtros anchos, como por ejemplo Pan-STARRS (AB \sim 24), DES (AB \sim 24) o LSST (AB \sim 27), mientras que otros adquieren espectros de millones de fuentes con un interés particular, como por ejemplo SDSS-IV, LAMOST o WEAVE. En este contexto, el Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ), operado por el Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA), cubre un nicho único, siendo el primer observatorio profesional dedicado de forma íntegra a la consecución de grandes cartografiados multifiltro, es decir, a observar de forma indiscriminada grandes volúmenes del Universo con un conjunto de filtros estrechos que proporcionan información espectral de baja resolución para cada fuente catalogada.

J-PLUS: JAVALAMBRE PHOTOMETRIC LOCAL UNIVERSE SURVEY

El OAJ dispone de dos telescopios dedicados: el Javalambre Survey Telescope (JST), con un espejo primario de de 2.5 metros de diámetro y un campo de visión de 7 grados cuadrados, y el Javalambre Auxiliary Survey Telescope (JAST), con 80 cm de diámetro y 3 grados cuadrados de campo de visión. El JST se encargará en un futuro próximo de realizar el cartografiado J-PAS (Javalambre Physics of the accelerating universe Astrophysical Survey; 54 filtros estrechos de ~140Å en el rango óptico), mientras que desde finales de 2015 el JAST está realizando el cartografiado J-PLUS.

El instrumento montado en el JAST es T80Cam, una cámara con un campo de visión de 2 grados cuadrados equipada con un único CCD de gran formato (9,2k x 9,2k) y doce filtros ópticos. El conjunto de doce filtros (Figura 1) está formado por cinco anchos (*ugriz*) y siete estrechos, estos últimos localizados en zonas claves del espectro óptico: cuatro cubriendo la discontinuidad espectral a 4000Å,



Figura 1. La galaxia M33 observada con el sistema de doce filtros de J-PLUS.

uno la absorción de MgII a 5150Å, uno localizado a 6600Å para trazar la línea de H α en reposo y el último cubriendo la absorción del triplete del calcio a 8610Å. Gracias a este sistema de filtros, J-PLUS proporciona información relevante para el estudio de estrellas y galaxias con líneas de emisión, tanto locales como a alto desplazamiento al rojo.

J-PLUS DR1

Durante la XIII Reunión Científica de la SEA que tuvo lugar en Salamanca en julio de este año se hizo público para la comunidad internacional el primer conjunto de datos de J-PLUS. La DR1 del proyecto proporciona datos en un área de 1022 grados cuadrados (511 apuntados de JAST/T80Cam, con más de 18000 imágenes individuales; Figura 2). La reducción, validación y calibración de las imágenes ha sido realizada por la Unidad de Procesado y Archivo de Datos (UPAD) del CEFCA.

La profundidad típica de las imágenes en cada uno de los filtros es de AB ~ 21 (3σ en una apertura de 3 segundos de arco), excepto en los filtros *g* y *r* que alcanzan AB ~ 22 (Figura 3). La calibración, realizada mediante comparación con datos del SDSS y refinada utilizando técnicas estadísticas basadas en la secuencia particular que definen las estrellas en los diferentes diagramas color-color disponibles, tiene una precisión en todos los filtros y para todo el área muestreada del 2%.

El catálogo de fuentes extraído de las imágenes contiene unos 14 millones de objetos, con 4.3 millones de estrellas y 3 millones de galaxias más brillantes que r = 21. Además de la fotometría en una diversidad de aperturas, el catálogo también contiene una clasificación de las fuentes en extensa y puntual, temperaturas efectivas para estrellas de la Vía Láctea y desplazamientos al rojo fotométricos para objetos extragalácticos.

El acceso a los datos, tanto imágenes como catálogos, puede realizarse a través del portal web de J-PLUS (j-plus.es), estando disponible un navegador del cielo (Figura 4), búsqueda de un conjunto de objetos de interés o acceso en cola mediante protocolo ADQL. Todos los datos son compatibles y accesibles mediante herramientas del Observatorio Virtual.



Figura 2. Área del cielo cartografiada en la DR1 de J-PLUS.

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

La DR1 de J-PLUS ya ha dado lugar a siete artículos aceptados en Astronomy & Astrophysics y muchos otros están en preparación. Además del artículo de presentación tanto del cartografiado como de la DR1 (Cenarro et al. 2018, A&A, aceptado para su publicación; [ArXiv:1804.02667]), destacamos el estudio de la formación estelar en el Universo Local y la caracterización de cuásares a alto desplazamiento al rojo. Los resultados de ambos trabajos fueron presentados a la comunidad durante la última Reunión Científica de la SEA y demuestran el potencial científico de los datos de J-PLUS. En el primer caso (Vilella-Rojo et al., en preparación) se ha estudiado un conjunto de 655 galaxias cercanas, localizadas a menos de 70 Mpc de la Vía Láctea, para obtener la tasa de formación estelar de nuestra vecindad cósmica gracias al filtro estrecho *J0660* de J-PLUS, que traza la emisión de H α . Destacar que 165 de estas galaxias (25% de la muestra) no tienen ninguna información espectroscópica y han sido ubicadas en el volumen local gracias a los datos de J-PLUS (Figura 4).



Figura 3. Distribución de la magnitud límite (3σ en una apertura de 3 segundos de arco) en cada uno de los 511 apuntados de la DR1 de J-PLUS. Las líneas verticales marcan la magnitud límite esperada para el cartografiado.



Figura 4. Ejemplos ilustrativos del navegador de J-PLUS. En el panel superior se muestra una galaxia del Universo local, localizada a menos de 70 Mpc de la Vía Láctea gracias a los datos de J-PĽUS, cuya emisión en $H\alpha$ es evidente en el filtro J0660. En el panel inferior podemos ver un candidato a cuásar, identificado gracias a su emisión en el filtro J0395, y confirmado como un emisor de Ly α a z=2.2 con espectroscopía de OSIRIS/GTC.

En el segundo caso (Spinoso et al., en preparación) se utiliza el exceso en los filtros estrechos más azules de J-PLUS para buscar objetos distantes con líneas de emisión. En particular, se ha utilizado el filtro *J0395* para buscar emisores a $z \sim 2.2$, encontrándose más de 600 candidatos en la DR1 (Figura 4). El seguimiento espectroscópico de 20 de estas fuentes con OSIRIS/GTC ha confirmado el 85% de la muestra como cuásares a alto z, con un 75% a z = 2.2 (emisión de Ly α) y un 25% a z = 1.5 (emisión de CIV).

PERSPECTIVAS Y FUTURO

La DR1 del cartografiado J-PLUS representa un hito científico de calado para el OAJ, la UPAD y el CEFCA. Concebidos desde un principio para muestrear de forma eficiente el Universo, proporcionar los datos de forma accesible y transparente, y explotar científicamente los catálogos producidos, la DR1 de J-PLUS supone la culminación de un periodo de construcción, desarrollo y optimización en todos los aspectos del proceso: toma de imágenes, reducción, análisis y publicación de resultados en revistas internacionales.

Pero apenas estamos al principio de camino. J-PLUS continúa escaneando el cielo de forma sistemática, con más de 1400 grados cuadrados observados a día de hoy. Por otra parte, el JST ya está equipado con una cámara científica de primera luz, más modesta que el instrumento definitivo JPCam (14 CCDs vs. 1 CCD), pero que ya ha observado un grado cuadrado del cielo con todos los filtros estrechos de J-PAS. Este conjunto de datos, actualmente en fase de reducción y validación, nos preparará para la ingente y compleja cantidad de información que la comunidad tendrá disponible durante la próxima década gracias al cartografiado J-PAS.

GTCAO, acrónimo de "Gran Telescopio Canarias Adaptive Optics", es el sistema general de Óptica Adaptativa que se instalará en el foco Nasmyth B del Gran Telescopio de Canarias (GTC). Su objetivo es suministrar imágenes limitadas por difracción en el infrarrojo cercano al instrumento científico, el primero de los cuales será FRIDA ("inFRared Imager and Dissector for Adaptive optics").







Víctor J. Sánchez Béjar Instituto de Astrofísica de Canarias vbejar@iac.es

Mª Rosa Zapatero Osorio Centro de Astrobiología (CSIC, INTA) mosorio@cab.inta-csic.es

Almudena Prieto

Instituto de Astrofísica de Canarias aprieto@iac.es En día 1, GTCAO dispondrá de un sistema mono-conjugado con un único espejo deformable de 21x21 actuadores (de los cuales se utilizarán 373), conjugado a la pupila del telescopio (el espejo secundario M2), y un sensor de frente de onda (WFS) de tipo Shack-Hartmann con 20x20 subaperturas que utilizará una estrella de guía natural (NGS) como fuente de referencia para medir las aberraciones de la atmósfera. El sistema GTCAO proporcionará una excelente calidad de imagen (Strehl Ratio de 0.65 en banda K) con una estrella de guía natural brillante (R < 13 mag). Posteriormente, GTCAO será actualizado para emplear una estrella guía con láser (LGS) que permitirá observar con estrellas de guía natural más débiles.

FRIDA es un espectrógrafo de tres dimensiones (3D) y una cámara de campo en el rango 0.9-2.5 μ m. El instrumento proporciona imagen - hasta 40" de campo de visión - y espectroscopia 3D al límite de difracción de GTC (desde 25 mas en banda J a 40 mas en banda K) en un campo de visión más reducido de 8". El instrumento dispone de distintas escalas espaciales, una gran variedad de filtros y tres redes de difracción para las diferentes resoluciones espectrales (R = 1300 hasta 30.000).

El pasado 26 de octubre de 2018 tuvo lugar en Madrid, en la sede central del CSIC en la Calle Serrano, la reunión organizada por la Red de Infraestructuras de Astronomía (RIA): "FRIDA + GTCAO: ciencia con la primera instrumentación de óptica adaptativa en GTC". El objetivo fue poner en conocimiento de la comunidad española las prestaciones de las que dispondrá GTC con sus sistema de Óptica Adaptativa (GTCAO) y su primer instrumento científico (FRIDA), así como poner en contacto a los investigadores con interés en la alta resolución espacial y establecer posibles casos científicos que se llevarán a cabo en los próximos años cuando esta instrumentación entre en operación.

Se presentaron numerosos casos científicos que requieren imágenes limitadas en difracción en telescopios de gran diámetro como GTC, que van desde los planetas y lunas de nuestro Sistema Solar hasta las galaxias más distantes, pasando por el estudio de las estrellas con disco y las enanas marrones de nuestra vecindad solar, las grandes regiones de formación estelar masiva en nuestra Galaxia o el estudio de los núcleos, bulbos,

FRIDA + GTCAO: CIENCIA CON ÓPTICA ADAPTATIVA EN GTC



pruebas

Dummies de rejillas

Componentes opto-mecánicos en el interior del instrumento FRIDA.

barras y otras estructuras de las galaxias del grupo local. Además, se presentaron casos científicos con posibles sinergias entre los sistemas de alta resolución espacial con Óptica Adaptativa en el infrarrojo y en radio. Por último, se discutió el

futuro de la instrumentación de la Óptica Adaptativa en GTC y se declaró, por parte de los participantes, un alto interés en contar con un sistema que permita obtener imágenes limitadas por difracción en un mayor campo de visión.



Diseño opto-mecánico de GTCAO (izquierda) y sistema alineado e integrado en el laboratorio del IAC (derecha).



Este encuentro, celebrado en Zaragoza los días 5 y 6 de noviembre de 2018, surgió como una iniciativa conjunta por parte del Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA), del Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC), y de la Universidad de Zaragoza, para poner en común los esfuerzos que cada una de estas tres instituciones aragonesas están invirtiendo en la búsqueda de respuestas para dos grandes problemas en la física del momento: la naturaleza de la materia y la energía oscuras.



Carlos Hernández Monteagudo Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón chm@cefca.es

En esta labor, estas tres instituciones participan y/o tienen responsabilidad directa en la gestión de dos instalaciones pertenecientes al mapa nacional de Infraestructuras Científico Técnico Singulares (ICTS): el Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ), de relativa reciente creación, y el más asentado Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC). La motivación última de este encuentro consistía pues en poner en contacto a dos comunidades distintas de investigadores en física, con una experiencia y una trayectorias diferentes, pero con metodologías en parte similares y objetivos científicos últimos coincidentes.

La reunión fue albergada por el Paraninfo de la Universidad de Zaragoza, cuya aula "Pilar Sinués" nos fue cedida de forma gratuita. Como expresión de apoyo al encuentro, a la inauguración acudieron no solamente los directores del OAJ y LSC, Dr. J. Cenarro (CEFCA-OAJ) y Dr. C. Peña-Garay (LSC), junto con el responsable de la Red de Infraestructuras en Astronomía, Dr. V. Martínez, sino también el Secretario General de Coordinación de Política Científica del Ministerio de Ciencia, el Dr. R. Rodrigo Montero, la Consejera de Investigación, Innovación y Universidad del Gobierno de Aragón, Sra. P. Alegría, la Directora General de ese mismo departamento, Sra. M. T. Gálvez, el rector de la Universidad de Zaragoza, Dr. J.A. Mayoral, y el Vicerrector de Política Científica de la Universidad de Zaragoza, Dr. L. M. García Vinuesa. Y fue en el transcurso de ese acto cuando se hizo público a los medios las dos propuestas recibidas en este contexto por la Universidad de Zaragoza, una para fundar un Centro de Astropartículas y Física de Altas Energías, y otra para crear un máster en Física del Universo.

El encuentro fue estructurado para alternar contribuciones de las dos comunidades. Así, después del acto inaugural, se procedió a la descripción de los proyectos científico-técnicos en desarrollo en las dos instalaciones ICTS, a cargo de personal perteneciente a esas dos infraestructuras. Esta primera sesión fue seguida por otra centrada en la búsqueda y caracterización de la materia y la energía oscura en cartografiados astrofísicos, en la que participaron especialistas como el Dr. R. Angulo (del *Donostia International Physics Center*), o el Dr. R. Jiménez (*ICREA-Universitat Central de Barcelona*). Este bloque temático fue seguido por otro que versaba sobre detección directa de materia oscura, y fue abierto

EXPLORANDO EL UNIVERSO OSCURO. SINERGIAS OAJ - LSC



Momento del acto inaugural.

por el Dr. C. Galbiati (Universidad de Princeton), quien proporcionó un resumen del contexto histórico y científico de los esfuerzos en este campo. A continuación se detalló, por parte de la Dra. Sarsa (Universidad de Zaragoza), los esfuerzos que actualmente se realizan desde el LSC para reproducir, y así poder confirmar o refutar, el controvertido experimento DAMA-LIBRA. Con esta sesión se dio por finalizado el primer día del encuentro, que culminó con una cena en el restaurante Tres Mares del Club Náutico de Zaragoza, a orillas del río Ebro.

El día siguiente, 6 de noviembre, comenzó con una sesión dedicada a esfuerzos de detección de mate-

ria oscura con experimentos inminentes, como son el *Cherenkov Telescope Array*, impartida por el Dr. J. Cortina (CIEMAT), o el experimento CYGNO, sobre el que hablaron el Prof. N. Spooner (Universidad de Sheffield) y la Dra. E. Barrachini (*Gran Sasso Science Institute*). Las siguientes contribuciones corrieron a cargo de investigadores jóvenes, estudiantes de doctorado y postdocs, que tocaron temas variados relacionados con la energía oscura, los agujeros negros como candidatos a materia oscura, y la búsqueda indirecta de materia oscura con el experimento Fermi-LAT.

Esta sesión fue seguida por una discusión, moderada en su mayor parte por el Dr. C. Peña-Garay, sobre la perspectiva futura de la búsqueda de materia oscura, la motivación de las corrientes actuales de investigación (¿es todavía sólida la motivación teórica que sustenta la búsqueda de materia oscura?, ¿por qué los axiones concentran actualmente tantas expectativas si fueron propuestos hace ya más de veinte años?, etc), y el contexto proporcionado por otros esfuerzos en el campo de las astrofísica y cosmología.

Los axiones fueron los protagonistas del siguiente apartado, que fue abordado desde el punto de vista teórico por el Dr. J. Redondo (Universidad de Zaragoza), y desde un punto de vista astrofísico por los Dres. O. Straniero (INAF), I. Domínguez (Universidad de Granada), y J. Isern (ICE-CSIC/IEEC). Esta sesión dejó patente, de forma muy evidente, las sinergias existentes entre los dos campos, y la necesidad de actuar de una forma conjunta y coordinada.

El encuentro finalizó con un bloque sobre teoría de materia oscura, con contribuciones desde el punto de vista de la supersimetría (Dr. S. Heinemeyer, IFT/IFCA-CSIC), o desde el punto de vista de los agujeros negros primordiales (Dr. C. Germani, *Universitat Central de Barcelona*). Se describió también un estudio sobre el límite último e inevitable en el fondo de ruido en ex-

Foto de familia de la reunión.



perimentos de detección de materia oscura, debido a los neutrinos, (Dr. D. Cerdeño, IPPP). Esta última sesión culminó con un análisis del impacto que episodios de acrecimiento sobre nuestra galaxia puedan tener en la velocidad de la materia oscura en la vecindad del Sol, y en consecuencia, en la interpretación de las medidas de experimentos que buscan materia oscura vía una modulación anual (Dr. C. O'Hare, Universidad de Zaragoza). Esta última contribución cerró pues la reunión con otro ejemplo claro de las sinergias existentes entre las dos disciplinas de la física que se encontraron durante esos dos días en el Paraninfo de la Universidad de Zaragoza. En total inscribieron 60 participantes a la reunión, de lo cuales 8 de ellos fueron cubiertos por los 2.100,56 € proporcionados por la RIA:

- Nuria Castelló (IFCA/CSIC-UC)
- Javier Coronado-Blázquez (IFT-UAM/CSIC)
- Juan Cortina (CIEMAT)
- Diego Cruces (ICC, Universitat de Barcelona)
- Marc Oncins (ICCUB, Universitat de Barcelona)
- Ana M^a Salinas (Universidad de Zaragoza)
- Neil Spooner (Universidad de Sheffield)
- Rocío Vilar Cortabitarte (IFCA/CSIC-UC)



El encuentro RIA-SpaceTec: Instrumentación astronómica en España tuvo lugar del 3 al 5 de octubre de 2018, en el edificio Central del Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) situado en la calle Serrano 117, Madrid. El encuentro fue organizado por la red SpaceTec-CM (Desarrollo de nuevas tecnologías para instrumentación espacial en la Comunidad de Madrid), con el apoyo y la financiación de la Red de Infraestructuras en Astronomía (RIA, financiada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, mediante la acción AYA2017-90868-REDI), en colaboración con CDTI y la Agencia Estatal de Investigación (Coordinadores de las Áreas de Astronomía y Astrofísica, Espacio y Física de Partículas).

Estas jornadas son una continuación de las que se han venido organizando desde 2007, primero en las redes ASTRID y ASTROMADRID, y posteriormente con SpaceTec-CM y tienen como objetivo ofrecer un foro de discusión a la comunidad astronómica nacional involucrada en el desarrollo de instrumentación, incluyendo tanto científicos en organismos públicos como empresas involucradas en instrumentación.

La reunión se dividió en tres grandes bloques: una primera sesión dedicada a Espacio, una segunda parte dedicada a los Observatorios Nacionales y un último bloque sobre Observatorios Internacionales, en el que además se presentó el programa del European Southern Observatory.

Durante las jornadas se presentaron el estado y los primeros resultados de los nuevos instrumentos instalados en los observatorios nacionales, así como la próxima generación de instrumentación para GTC, los observatorios canarios y Calar Alto. Además, se dieron a conocer las próximas misiones de Astrofísica Espacial y de exploración del Sistema Solar.

Otro de los temas discutido durante la reunión fue el estado de los grandes proyectos instrumentales que están ya en marcha: CTA, SKA, ELT, EST...

Asimismo, el día 5 de octubre, durante la sesión de la mañana tuvo lugar la celebración del 11º aniversario de la fundación de la Red de Infraestructuras de Astronomía y que contó con la participación de los tres presidentes que ha tenido la RIA (Xavier Barcons, Jordi Torra y Vicent Martínez), así como la intervención de José Doncel, Subdirector General de Grandes Infraestructuras Científico-Técnicas del Ministerio.

PROGRAMA DE LA REUNIÓN

La reunión contó con sesiones sobre Espacio, Observatorios Nacionales y Observatorios Internacionales. En el siguiente enlace pueden consultarse las presentaciones que se hicieron, así como las comunicaciones en formato póster: https://spacetec.cab.inta-csic.es/meetings/ria2018/

PARTICIPACIÓN

El registro de la reunión fue gratuito y a ella asistieron 180 investigadores de toda España.



J. Miguel Mas Hesse Centro de Astrobiología (CSIC, INTA) mm@cab.inta-csic.es

RIA-SPACETEC: INSTRUMENTACIÓN ASTRONÓMICA EN ESPAÑA



Científico-técnico (SOC)

J. Miguel Mas Hesse (CAB), coordinador SpaceTec Jesús Gallego Maestro (UCM), coordinador SOC Enrique Solano (CAB) J. Antonio Rodríguez-Manfredi (CAB) Tomás Belenguer (INTA) Jose Luis Costa Krämer (IMM) Marisa Dotor Castilla (IMM) Félix Salazar Bloise (UPM) Juan de Vicente Albendea (CIEMAT) M. Dolores Rodríguez Frías (UAH) Francisco Najarro (CAB) Begoña García Lorenzo (IAC) Olga Muñoz (IAA) Pilar Román (CDTI)

Organización local (LOC)

Virginia Suárez (CAB), coordinadora LOC Ainhoa Sánchez-Penim (UCM) J. Miguel Mas Hesse (CAB) Lucía García (UCM) Cristina Cabello (UCM) Mario Chamorro (UCM) Carlos Tapia (UCM)



El Comité Científico-Técnico (SOC) del encuentro estuvo formado por los investigadores responsables de los grupos que conforman la red SpaceTec-CM:

- Jesús Gallego Maestro (UCM), coordinador del SOC
- J. Miguel Mas Hesse (CAB), coordinador de SpaceTec
- Enrique Solano (CAB)
- J. Antonio Rodríguez-Manfredi (CAB)
- Tomás Belenguer (INTA)
- Jose Luis Costa Krämer (IMM)
- Marisa Dotor Castilla (IMM)
- Félix Salazar Bloise (UPM)
- Juan de Vicente Albendea (CIEMAT)
- M. Dolores Rodríguez Frías (UAH)
- Francisco Najarro (CAB)
- Begoña García Lorenzo (IAC)
- Olga Muñoz (IAA)
- Pilar Román (CDTI)

El Comité Organizador Local (LOC) estuvo formado por personal del Centro de Astrobiología (CAB) y la Universidad Complutense de Madrid (UCM):

- Virginia Suárez (CAB), coordinadora LOC.
- Ainhoa Sánchez-Penim (UCM)
- J. Miguel Mas Hesse (CAB)
- Lucía García (UCM)
- Cristina Cabello (UCM)
- Carlos Tapia (UCM)
- Mario Chamorro (UCM)



RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Esta reunión puso de manifiesto una muy saludable reactivación de la comunidad astronómica española en el ámbito de los grandes desarrollos instrumentales. Tras varios años de crisis en los que los proyectos lucharon por sobrevivir, la comunidad muestra de nuevo una gran iniciativa y entusiasmo, con la aparición de nuevas ideas y proyectos, y con el comienzo de nuevas colaboraciones entre la comunidad científica y las empresas del sector. Los grandes proyectos en marcha se acercan a su final, mientras nuevos desafíos (como la participación en la instrumentación del ELT o las nuevas misiones de la ESA) arrancan con fuerza.

Especialmente relevante es la cifra récord de 180 asistentes, incluyendo tanto científicos como personal de empresa, lo que confirma el interés general por este tipo de reuniones en las que los contactos y la discusión informal son una parte fundamental.



Un título tan general como el nuestro puede parecer excesivo e incluso pretencioso. Naturalmente, no pretendemos abarcar toda la física solar hecha y por hacer en este siglo. Entre otras cosas, la razón principal es que, seguramente, no sabríamos dar cuenta exhaustiva de todos los retos afrontados, conseguidos y por venir. El abanico de posibilidades científicas que ofrece nuestra disciplina es tan amplio que un análisis cabal superaría el ámbito de cualquier artículo de este boletín. De forma más humilde, nosotros queremos ofrecer algunas pinceladas de nuestra perspectiva personal de la situación que la física solar enfrenta para el próximo futuro y para ello, de forma natural, hemos de revisar lo hecho hasta ahora.





Manuel Collados Instituto de Astrofísica de Canarias mcv@iac.es

Jose Carlos del Toro Iniesta Instituto de Astrofísica de Andalucía jti@iaa.es

1. INTRODUCCIÓN

Aquí también nos restringiremos a lo que conocemos de cerca, esto es, a lo que los físicos solares españoles hemos venido haciendo durante los últimos 50 años. Porque sí, aunque la historia del Sol tiene una duración de 4500 millones de años, la Física Solar moderna tiene en España apenas 50: el primer artículo científico que se puede encontrar en el ADS firmado por un español data de 1968 (Casanovas, 1968; hay también una reseña a un artículo de la revista Urania -española- de 1967 pero cuyo texto no es fácilmente accesible). En estos 50 años el crecimiento de la cantidad, la calidad y la influencia internacional de la física solar española ha sido marcadísimo. No es que queramos recurrir a la autocomplacencia. Simplemente queremos reconocer el trabajo colectivo de muchos colegas¹ que han venido contribuyendo a situar nuestra comunidad en un puesto reconocido en el ámbito internacional. Si por aquel entonces, a finales de los 1960 y durante los 1970, los trabajos eran fundamentalmente observacionales y fotométricos en la fotosfera utilizando instrumentos desarrollados por colegas internacionales (e.g., Vázquez 1973), la espectroscopía empezó a cultivarse con el nuevo decenio (Pérez Garde et al. 1981), las observaciones cromosféricas también comenzaron (Ballester, J.L. 1983) y aparecen los primeros trabajos teóricos influyentes (e.g., Moreno-Insertis 1983, Ballester & Priest 1987).

A principios de los 1980 también se participa en los primeros trabajos que anuncian el descubrimiento de la oscilación solar de cinco minutos (Claverie et al. 1980). Con dicho descubrimiento comienza la exitosa rama de la heliosismología. Ya a finales del decenio despiertan los primeros albores de la espectropolarimetría (e.g., Sánchez Almeida et al. 1988), disciplina que florecerá desde los 1990 hasta el presente (e.g., Ruiz Cobo & Del Toro Iniesta 1992, Del Toro Iniesta 2003). En la última década del siglo pasado los físicos solares teóricos consolidan su prestigio en el complejo campo de la magnetohidrodinámica (e.g., Oliver et al. 1992, Ferriz-Mas & Moreno-Insertis 1992), en el del transporte radiativo (e.g., Trujillo Bueno & Landi Degl'Innocenti 1997) y empiezan los esfuerzos instrumentales (Ballesteros et al. 1996, Collados et al. 1996, Martínez Pillet et al. 1999). El primer decenio de este siglo continúa mostrando una influyente contribución de una comunidad española cada vez más madura que

aborda problemas de índole observacional tanto desde tierra (e.g., Martínez González et al. 2008, Bellot Rubio et al. 2004) como desde el espacio (e.g., Orozco Suárez et al. 2007), o de índole teórica (e.g., Socas-Navarro et al. 2000, Khomenko & Collados 2006, 2009, Trujillo Bueno et al. 2004, Asensio Ramos et al. 2008, Goosens et al. 2009), o de índole instrumental (e.g., Collados et al. 2007). En el decenio de los 2010 podemos destacar el éxito científico de la misión estratosférica Sunrise (Solanki et al. 2010, Barthol et al. 2011), una colaboración germana-norteamericana-española. Tras sus dos primeros vuelos, ha obtenido una abundante producción científica internacional, de la cual el 83 % utiliza datos del magnetógrafo español IMaX (Imaging Magnetograph eXperiment; Martínez Pillet et al. 2011); el 52 % de los artículos utiliza IMaX en exclusiva.

En 2014 comenzó asimismo su andadura el telescopio alemán GREGOR ubicado en el Observatorio del Teide. Con sus 1,5 metros de abertura es el mayor telescopio europeo en operación en la actualidad. Cabe resaltar que uno de sus instrumentos es el espectrógrafo GRIS (Collados et al. 2012) diseñado, construido y operado en su totalidad por el IAC. Es un instrumento de uso común desde la primera luz del telescopio y con él se puede realizar espectropolarimetría en el infrarrojo cercano no térmico. Se trata del instrumento más demandado por la comunidad científica. El 74% de las publicaciones realizadas con datos de GREGOR se han basado en datos obtenidos exclusivamente con este instrumento. Es importante mencionar que este desarrollo fue posible gracias a la construcción y exitosa operación de los polarímetros TIP y TIP-II en el telescopio VTT desde 1999 (Martínez Pillet et al. 1999 y Collados et al. 2007).

En este mismo decenio se consolidan los cuatro grandes proyectos instrumentales en los que la



Figura 1. La misión estratosférica Sunrise, en el campo de la estación espacial de Kiruna (Suecia) momentos antes de su lanzamiento el 8 de junio de 2009.

comunidad nacional se encuentra inmersa: la misión Solar Orbiter de la ESA con el liderazgo del consorcio internacional que ha desarrollado el detector de partículas EPD (Energetic Particle Detector; Rodríguez-Pacheco et al. 2016) y el coliderazgo del consorcio internacional que ha fabricado el magnetógrafo SO/ PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager for Solar Orbiter; Solanki et al. 2015); el European Solar Telescope, con liderazgo español y que será instalado en uno de los observatorios canarios (Collados et al. 2010); el Daniel K. Inouye Solar Telescope, del National Solar Observatory americano ---bajo la dirección de un español-;² y la tercera edición de la misión Sunrise, esta vez con financiación de la sociedad Max Planck alemana (MPG), las agencias espaciales norteamericana (NASA), japonesa (JAXA) y la Agencia Estatal de Investigación española (AEI), con el magnetógrafo íntegramente español IMaX+ y el coliderazgo del espectropolarímetro infrarrojo SCIP (Sunrise Chromospheric Infrared Polarimeter), construido en colaboración con nuestros colegas japoneses.

En cierto sentido se puede decir que la física solar moderna comenzó en 1995 con el lanzamiento del satélite SoHO (Domingo et al. 1995), cuya finalidad era estudiar el interior del sol (a través de la heliosismología), la corona solar y el viento solar. Para ello contaba, entre otros, con instrumentos que observaban el sol completo en el ultravioleta o la corona solar más externa hasta distancias relativamente grandes con ocultadores del disco. Pronto quedó claro que la corona solar es muy activa y que su fenomenología y dinámica están dictadas por el campo magnético. Las líneas de campo magnético podían ser bien abiertas y adentrarse en el medio interplanetario, acarreando consigo la componente rápida del viento solar, o bien ser cerradas y retornar al disco solar en distancias determinadas por los tamaños de las regiones activas. Los brillos asociados a las diferentes estructuras coronales también se vieron muy correlacionados con la presencia de campo magnético en la superficie (en la fotosfera, medida igualmente con uno de sus instrumentos). Fue en estos momentos cuando la comunidad internacional de física solar fue adquiriendo poco a poco conciencia de que es necesario estudiar el Sol como un todo. Todas las capas están interconectadas entre ellas. Los fenómenos observados a diferentes alturas pueden manifestarse de

manera diferente pero todos ellos tienen un ingrediente común: el campo magnético. En virtud de la ley de Maxwell que establece que las líneas de campo son cerradas (o sea, que toda línea de campo que salga del Sol debe retornar a él en alguna otra posición), el campo magnético establece una ligadura entre las diferentes capas. Para entender esta conexión, es vital recurrir a la magnetohidrodinámica, rama de la ciencia que estudia el comportamiento de los plasmas magnetizados. Hay varias consecuencias fundamentales que es conveniente resaltar para poder entender la importancia del campo magnético en todos los fenómenos solares.

1.1. Conceptos de magnetohidrodinámica

En primer lugar, el comportamiento del plasma está determinado por el (des)equilibrio entre las fuerzas a las que está sometido como fluido normal (esencialmente las derivadas de la gravedad y de los gradientes de la presión gaseosa) y la fuerza de Lorentz que ejerce el campo sobre las cargas del plasma. Por debajo de la superficie, las primeras dominan y el campo magnético es un mero "espectador" pasivo que se deja llevar. En las capas más externas del interior del Sol, como en toda estrella de los últimos tipos, el transporte de energía tiene lugar fundamentalmente por convección. Las celdas convectivas más evidentes de la superficie solar (granulación) son claramente distinguibles en las filas superior e inferior de la figura 3. Este proceso convectivo es esencialmente hidrodinámico y el campo magnético solamente se presenta como una pequeña perturbación. A pesar de ello, el campo magnético sufre una dramática transformación como resultado de un teorema fundamental de la magnetohidrodinámica: el denominado teorema de Alfvén o de congelamiento del campo magnético. Este teorema establece que el campo magnético es arrastrado por los movimientos del plasma. Como consecuencia, allí donde los movimientos son divergentes (en los centros de las celdas convectivas) el campo es arrastrado o expulsado hacia fuera y, por el contario, en las zonas donde el movimiento del material es convergente (bordes de celdas convectivas adyacentes) el campo magnético se acumula y se amplifica. Así pues, ese papel de actor pasivo del campo magnético sub-superficial le permite ir ganando relevancia e ir incrementando su energía a costa de la energía cinética del plasma asociada al movimiento convectivo.

La historia no acaba aquí. Aunque débiles, las fuerzas magnéticas hacen que las fuerzas derivadas de la presión gaseosa no tengan que ser tan intensas para mantener un determinado equilibrio y la consecuencia es que, a medida que el campo magnético se va concentrando, las estructuras se van evacuando y, por efecto de flotabilidad (el conocido principio de Arquímedes), tienden a ascender a la superficie. En todo este proceso, los movimientos convectivos concentran el campo magnético y este tiende a ascender hacia la superficie.

A medida que esa estructura magnética va subiendo, se va encontrando con un medio cada vez menos denso y donde las fuerzas de la presión son cada vez menos intensas y van perdiendo relevancia y la van ganando las fuerzas magnéticas. Dependiendo de la intensidad del campo magnético almacenado, las dos fuerzas se igualan en alguna capa ligeramente por debajo de la superficie (es el caso de las manchas solares, con un campo intenso de 2000-3000 Gauss en la superficie) o en alguna capa de la atmósfera solar (fotosfera/cromosfera), donde el material es tan poco denso y transparente que la radiación puede escapar casi libremente (o, mejor dicho, tiene un recorrido libre medio grande). A partir de aquí se inicia el reinado del campo magnético, en el que determina la casi totalidad de la fenomenología observable (las capas subfotosféricas no son accesibles por métodos directos debido a la gran opacidad del material). El campo magnético tiende en ese momento a expandirse de manera casi libre en la atmósfera para intentar ocupar todo el volumen ya que no hay fuerzas gaseosas que lo impidan. Es lo que se denomina un campo libre de fuerzas.

Esta predominancia del campo magnético en la atmósfera solar da lugar a situaciones completamente diferentes a las que ocurren en el interior. Por una parte, el movimiento del material solo se puede realizar a lo largo de las líneas de campo. La fuerza de Lorentz es lo suficientemente intensa como para inhibir cualquier movimiento perpendicular. Por esa razón, el viento solar, la expulsión continua de partículas cargadas hacia el medio interplanetario, es canalizado a lo largo del campo magnético. También es usual ver arcos por todas partes en la corona solar, como consecuencia del retorno de las líneas de campo a la superficie solar. Una segunda conclusión importante es que la conducción de calor es mucho más eficiente a lo largo del campo magnético que en la dirección perpendicular a él. Una liberación localizada de energía hará que el material calentado en consecuencia tienda a calentar el material próximo colocado preferentemente en la dirección del campo. De esta manera, por la alta conducción térmica, el material conectado por líneas de campo tiende a tener gradientes de temperaturas suaves en la corona.

1.2. Calentamiento magnético

Queda, sin embargo, por determinar cuáles son esas fuentes de energía que permiten calentar localmente el material. Aquí entramos en uno de los principales problemas de la física solar actual. Hay diversas formas por las que se puede depositar energía en el plasma de la atmósfera solar y calentarlo y todas ellas tienen como ingrediente principal el campo magnético en procesos en los que se convierte la energía magnética acumulada en el interior en energía cinética del plasma (bien energía cinética global que acelera las partículas del plasma, bien energía cinética térmica que lo calienta; en general, ambas conjuntamente). Sin entrar en el detalle de la gran cantidad de teorías existentes, estas se dividen en dos grandes grupos: las basadas en la liberación de energía a través de la disipación directa del campo magnético o a través de sus fluctuaciones inducidas por la propagación de ondas.

La primera categoría se basa en que cuando se juntan dos líneas de campo magnético de diferente polaridad tienden a aniquilarse mutuamente de forma local (la suma de dos campos magnéticos de igual intensidad y dirección opuesta es igual a cero). Como la energía asociada al campo no puede destruirse, aunque este desaparezca, se debe convertir en energía cinética global y térmica. Además, como las líneas de campo no se pueden cortar como una cuerda (han de ser cerradas por las leyes de Maxwell), se produce una redistribución del campo magnético conectando las líneas de campo de manera diferente allí donde se ha producido la cancelación. Es el fenómeno conocido como reconexión y que solo puede ocurrir a pequeña escala. Solo cuando dos líneas de campo están muy juntas se puede producir esa reconexión.

La segunda categoría está relacionada con el tipo de ondas que se pueden propagar en un plasma: son las ondas magnetohidrodinámicas. En un fluido no magnetizado se pueden propagar de manera natural ondas acústicas como consecuencia de las fluctuaciones de la presión gaseosa. En un plasma magnetizado también intervienen las fuerzas magnéticas. La combinación de ambas fuerzas da lugar a un sinfín de tipos de ondas que son llamadas magnetoacústicas, en función de la topología del campo magnético. Igualmente, se pueden propagar ondas exclusivamente magnéticas: las denominadas ondas de Alfvén. Como todas las ondas, se pueden transmitir, reflejar y refractar en función de las condiciones del medio.

Como último ingrediente para esta generación de las ondas, tenemos que tener en cuenta que los campos magnéticos tienen sus raíces en las zonas subfotosféricas donde el movimiento del plasma es el que domina. Los "pies" de las estructuras magnéticas están constantemente siendo movidos y perturbados localmente por los movimientos convectivos y generando ondas de todo tipo que se van propagando en diferentes direcciones, refractándose, reflejándose, convirtiéndose las unas en las otras (unas quedarían atrapadas y otras escaparían guiadas por el campo magnético y liberando en algún momento su energía al medio...).

Todas estas perturbaciones originadas por el campo magnético tienen también sus repercusiones en la topología del campo en las capas altas de la atmósfera solar. Eventualmente, dos líneas de campo de polaridad opuesta pueden aproximarse tanto como para que se produzca localmente una disipación de campo magnético. Alternativamente, nuevo campo magnético emergente a la superficie puede encontrar otra estructura magnética que había aparecido con anterioridad y, de nuevo, producirse una reconfiguración del campo magnético con la correspondiente liberación de energía.

Este es el juego de la física solar actual: cómo convertir energía magnética en energía cinética global del material (y explicar, por ejemplo, las bien conocidas eyecciones de masa coronal) o en energía cinética térmica (y explicar, por ejemplo, las fulguraciones). Todos estos fenómenos nos llevan a la que, quizás, es la principal conclusión que se puede extraer de la misión SoHO: la física solar actual necesita tanto grandes telescopios en tierra como misiones espaciales con telescopios más modestos pero que exploten las ventajas de la ausencia de atmósfera. Los dos aspectos son necesarios para poder llegar a entender el Sol como un único sistema ligado por el campo magnético.

Por una parte, la liberación de energía magnética es un fenómeno localizado a pequeña escala (aunque pueda afectar a zonas extensas) que obliga a tener telescopios cada vez más grandes con los que poder ver y estudiar los detalles de cómo se produce la interacción plasma-campo magnético. Asimismo, se requieren instrumentos cada vez más sensibles al campo magnético y a sus variaciones espaciales y temporales (a través de la polarización de la luz). Este desarrollo solo es posible en tierra (o, parcialmente, con globos estratosféricos) y ha dado lugar a la nueva generación de telescopios terrenos, de clase cuatro metros.

Por otra parte, las líneas de campo conectan las diferentes capas de la atmósfera solar, pasando por zonas donde domina la presión del plasma (baja fotosfera, en general) a zonas donde domina el campo (corona). La alta fotosfera y la cromosfera (la capa inmediatamente por encima de la fotosfera y por debajo de la corona) constituyen una región donde las fuerzas están equilibradas y es donde más "fácilmente" se puede producir esa liberación de energía magnética en energía para el plasma. La nueva generación de telescopios terrenos está enfocada a entender esta fina capa de transición, donde el equilibrio de fuerzas cambia, donde las ondas pueden cambiar su naturaleza y donde la disipación de energía magnética se puede producir con mayor frecuencia como consecuencia de la cercanía de las perturbaciones introducidas por los movimientos convectivos en el campo magnético.

Además, para completar el estudio, el acoplamiento espacial que introduce el campo magnético a larga distancia entre puntos muy separados en su superficie, como consecuencia del retorno de las líneas de campo, son necesarios telescopios que permitan observar el Sol completo, y sobre todo la corona

(para poder estudiar la conectividad a grandes distancias) y las propiedades de las partículas eyectadas por el sol. Esto último solo es posible desde el espacio con observaciones remotas en el ultravioleta o rayos X e instrumentos in situ para detectar las partículas y las fluctuaciones de campo que llevan asociadas. La perspectiva de una observación de un mismo objetivo en todo el espectro electromagnético es una cualidad que solo se puede alcanzar desde el espacio y muchos de los fenómenos relevantes (sobre todo en las capas superiores) se manifiestan en el espectro de altas energías desde el ultravioleta. Los instrumentos espaciales ofrecen también una ventana fundamentalmente estable en grandes escalas temporales que permite el seguimiento evolutivo de unas estructuras solares tremendamente dinámicas que no se puede garantizar desde tierra a esas escalas debido al seeing, a pesar de los excelentes resultados de la óptica adaptativa. Por último, el espacio nos permite la observación inédita del Sol a distancias extremadamente próximas e incluso separándonos del plano de la eclíptica, lo cual, por ejemplo, nos puede ofrecer información sin precedentes sobre los polos.

2. OBSERVACIONES DE VANGUARDIA

Como en otras ramas de la Astrofísica, la Física Solar evoluciona y mejora sus resultados gracias en gran medida al uso de nueva tecnología. Telescopios e instrumentación posfocal cada vez más sofisticados van apareciendo paulatinamente, tanto para observatorios terrestres como aeroespaciales. Así mismo, la astrofísica computacional ha llegado a su máxima expresión abordando problemas solares para los





cuales disponemos actualmente de simulaciones con un alto grado de verosimilitud y que nos permiten incluso dar nuevos pasos tecnológicos evaluando de antemano con certeza el grado de cumplimiento de objetivos que tendrán nuestros nuevos instrumentos. De nuevo, aquí la perspectiva será necesariamente sesgada y nosotros nos restringiremos a cuatro ingredientes fundamentales: altas resoluciones espacial y espectral, estabilidad temporal y gran precisión polarimétrica. Obviamente, estas características fundamentales de la instrumentación vendrán moduladas por la ciencia que se espera hacer con ellas y con las limitaciones tecnológicas de cada caso.

A los astrónomos casi no hace falta justificarles la necesidad para aumentar la calidad de esos ingredientes observacionales, pero simplemente como muestra podemos mencionar cómo uno de los más importantes cambios de paradigma experimentados en los últimos años ha venido asociado a la progresiva mejora de los mismos. Durante prácticamente todo el siglo pasado estuvimos asociando "Sol activo" con Sol magnético y lo identificábamos con las manchas solares y regiones cercanas donde nos constaba había intensas concentraciones de campo magnético. Las manifestaciones de actividad como fulguraciones, protuberancias dinámicas o eyecciones de masa coronal estaban asociadas con ese campo magnético de manchas y regiones advacentes. Por contraposición, hablábamos de "Sol en calma" refiriéndonos al resto de la superficie del disco solar e, implícitamente, lo identificábamos con Sol no magnético. A partir de mediados de los años 1960 comenzamos a aprender que ese Sol en calma albergaba concentraciones magnéticas a muy pequeña escala (Sheeley 1966, 67, Harvey 1971); de hecho, estas concentraciones, conocidas familiarmente como «tubos de flujo» (Howard & Stenflo 1972, Frazier & Stenflo 1972, Stenflo 1973), fueron identificadas por métodos indirectos, no de imagen sino de polarimetría (y aquí entra el cuarto ingrediente al que hacíamos referencia arriba). Esas concentraciones a muy pequeña escala eran detectables tan solo en la huella de polarización que el campo magnético deja en las líneas espectrales (el segundo de los ingredientes), pero su tamaño se infería considerablemente menor que el de la resolución espacial de los telescopios del momento. En la última parte de los 1990, los magnetogramas (e.g., Title &

Schrijver 1998) obtenidos con el Michelson Doppler Imager (MDI; Scherrer 1995) a bordo de la misión SoHO (Domingo et al. 1995)³ ya mostraban un panorama en el que el disco completo se veía repleto de campo magnético a escalas de la supergranulación (~ 30-50 segundos de arco). Diez años más tarde, con datos del espectropolarímetro SP (Lites et al. 2001), a bordo del satélite japonés Hinode (Kosugi et al. 2007), supimos (Orozco Suárez et al. 2007, Lites et al. 2008) que el campo magnético también se observaba, más débil e inclinado, a escalas de la granulación (~ 3 segundos de arco; véase la Fig. 2). Habíamos pasado de una resolución espacial de 4", espectral de 9,4 pm y un análisis polarimétrico solo circular (y no muy preciso) en el caso de MDI, a una resolución espacial de 0,32 segundos de arco, espectral de 2,5 pm y un análisis completo de la polarización con una sensibilidad de 10-3. El nuevo salto fue dado con el magnetógrafo IMaX (Martínez Pillet et al. 2011) en la misión estratosférica Sunrise (Solanki et al. 2010): aunque volvíamos a una resolución espectral no tan alta (~ 6 pm), la resolución espacial se doblaba ---ahora estábamos en 0,11-0,15 segundos de arco- y con la misma sensibilidad polarimétrica. Ya éramos capaces de resolver espacialmente los tubos de flujo individuales (Lagg et al. 2010). Pero es que la estabilidad temporal (nuestro tercer ingrediente) se mostraba crucial para estudiar la evolución de estas estructuras magnéticas y comprender cómo algunas de ellas eran en realidad agrupaciones de otras aún más pequeñas y, lo que es más importante: la interacción que observábamos a escala supergranular de los campos magnéticos con los movimientos convectivos podía verse de forma análoga a escala mesogranular y granular (Requerey et al. 2015, 2017).

Con el paso de los años, nos hemos ido dando cuenta de que no podemos analizar el comportamiento de las estructuras solares tan solo en la capa que nos resulta más accesible a la observación espectropolarimétrica, la fotosfera. Las estructuras solares bien se extienden a través de las distintas capas, bien sufren fenómenos que tienen consecuencia en las otras capas. La física solar, pues, se convierte en un conjunto de problemas no locales, muchos de los cuales son, así mismo, no lineales. La única forma de dar cuenta cabal de los mismos pasa por el estudio integral de toda la atmósfera. Por otro lado, cada vez somos



Figura 3. El Sol observado en un campo de 53"×53"con óptica adaptativa multiconjugada (MCAO; columna de la izquierda), óptica adaptativa de la capa de tierra (GLAO; columna central) y óptica adaptativa clásica (CAO; columna derecha). Las dos primeras filas corresponden a un filtro de ancho de banda de 1 nm centrado en la longitud de onda central del TiO a 705,7 nm. La fila inferior está obtenida en la banda G, con un filtro de 0,5 nm de ancho de banda centrado en 430,5 nm. Adaptada de Schmidt et al. (2017).



Figura 4. Poros (manchas solares sin penumbra) en cuyos bordes se observan -por primera vezestructuras capiliformes y con aspecto de canal, reminiscentes del papel de las zonas intergranulares en la convección. Así mismo se observan filamentos brillantes con núcleos oscuros y alguno con apariencia de retorcimiento. Las marcas en los ejes corresponden a 1000 km sobre la superficie del Sol.

más conscientes de la influencia del Sol en todo el Sistema Solar y, más específicamente, en la Tierra. Estudiar la heliosfera como un sistema único nos permitirá un mejor diagnóstico de aquellos fenómenos que tienen influencia o consecuencias directas en nuestro hábitat; en definitiva se trata de estudiar lo que se conoce como clima espacial. Así pues, seguramente, las ambiciones de los físicos solares para los próximos decenios se centran en avanzar en dos aspectos científicos fundamentales: el acoplamiento (magnético) entre las distintas capas de la atmósfera y la transferencia y equilibrio energéticos entre ellas, por un lado, y en el estudio de la heliosfera como un todo con cuantos instrumentos tanto espaciales como terrenos tengamos a disposición, por el otro. Esas ambiciones han fraguado de momento en cinco instrumentos nuevos que la comunidad ya tiene a disposición y otros cuatro para el próximo futuro.

2.1. Nuevos instrumentos terrenos ya disponibles

Los avances instrumentales en astronomía terrena de los últimos 40 años han girado en torno a dos grandes focos: el observatorio americano de Sacramento (Sac) Peak en Sunspot, New Mexico, y los observatorios españoles de las Islas Canarias, el de El Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma, y el del Teide, en la de Tenerife. Ciertamente hay otros observatorios en los que se ha desarrollado intensa actividad y obtenido grandes resultados, pero estos tres han firmado la mayoría de los resultados observacionales importantes, al menos a nuestro juicio. En ellos se ha mantenido una actividad continua de mejora de la instrumentación y de actualización de las instalaciones telescópicas. De forma casi natural, la comunidad ha efectuado la transición de los telescopios de clase \sim 0,5 m a los de \geq 1 m de abertura. Mientras que en el caso americano, la política ha diversificado los sitios y los esfuerzos en los últimos años se han dedicado al Goode Solar Telescope, en el lago de Big Bear, en California, en los observatorios canarios, la torre solar sueca pasó de 0,5 a 1 m y el antiguo telescopio Gregory de 0,5 m pasó a tener 1,5 m de abertura. En paralelo, los esfuerzos en el desarrollo de instrumentación posfocal han sido parangonables a los de los nuevos telescopios.

En el caso espacial, sin olvidarnos del *anciano* SoHO, de la ESA, y que aún se encuentra activo, debemos destacar, sin duda, el satélite japonés (con contribuciones americanas) *Hinode*. Después de 11 años de servicio, su espectropolarímetro continúa proporcionando interesantísimos resultados. Así mismo, las aportaciones del satélite *Solar Dynamics Observatory*, de la NASA, están suministrando valiosísima información.

En esta sección nos restringimos a dar una visión necesariamente somera de los instrumentos posfocales que tenemos disponibles en estos telescopios o, al menos, aquellos que son útiles a la ciencia que hacemos usualmente los físicos solares españoles.

2.1.1. Goode Solar Telescope de Big Bear

Con 1,6 m, el Goode Solar Telescope (GST; Goode et al. 2003) es el telescopio solar activo de mayor abertura en suelo americano. Se trata de un sistema en el que los efectos nocivos del seeing se corrigen con un sistema de óptica adaptativa de alto orden. Actualmente se encuentran en pleno desarrollo de óptica adaptativa multiconjugada, cuyos primeros resultados con el prototipo disponible se pueden observar en la Fig. 3, adaptada de Schmidt et al. (2017). Mientras que la óptica adaptativa clásica (CAO en la figura) solo es capaz de corregir un campo de visión limitado, la multiconjugada (MCAO) amplía el campo corregido de forma significativa (aproximadamente un factor 3) y prácticamente alcanza el límite de difracción (0,08" en 500 nm y 0,16" en 1 μ m). En este prototipo se emplean tres espejos conjugados con otras tantas capas a tres alturas de la atmósfera. La óptica adaptativa de la capa de tierra (GLAO), sin embargo, aun no alcanzando la corrección de la multiconjugada, obtiene un campo de visión corregido mucho mayor, el cual puede ser de interés para determinadas observaciones, tal y como explican los autores.

GST cuenta con los siguientes instrumentos posfocales: un filtro de banda ancha (BFI), espectrómetro imaginador visible (VIS), un espectropolarímetro imaginador en el infrarrojo cercano (NIRIS) y un espectrógrafo solar con imagen rápida (FISS). Remitimos al lector interesado a la página http://www.bbso.njit.edu donde puede encontrar detalles de los instrumentos.

2.1.2. Torre solar sueca

Con su peculiar configuración refractora y de torre al vacío, el telescopio solar sueco (SST; Scharmer et al. 2003), en el Observatorio de El Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma, pasó a ser el telescopio solar más grande del mundo (en su momento) y el que ha proporcionado las imágenes con mejor resolución durante mucho tiempo. Tal calidad, cercana al límite de difracción, se ha logrado merced en gran medida a su sistema de óptica adaptativa (Scharmer et al. 2002), unido a las excelentes propiedades del sitio. El telescopio está provisto con un espectrógrafo Littrow de mediana resolución, pero que permite la observación simultánea en tres regiones espectrales distintas y con una unidad de rendija que permite la espectropolarimetría. Es sin duda esta disciplina la que ha proporcionado los resultados más importantes obtenidos en los últimos tiempos, con la incorporación del espectropolarímetro CRISP (Scharmer et al. 2008), que está basado en un interferómetro Fabry-Pérot dual, el cual proporciona una resolución espectral moderada de unos 6 nm a la longitud de onda de 630,2 nm; se trata de un polarímetro de doble haz con dos retardadores ópticos de cristal líquido nemáticos (LCVR por sus siglas en inglés) y un divisor de haz que envía los dos estados de polarización ortogonales a sendas cámaras CCD. Recientemente, se ha instalado el espectrómetro CHROMIS (Löfdahl et al. 2018), igualmente basado en un Fabry-Pérot dual, pero sin capacidades polarimétricas de momento. Está optimizado para su uso en las líneas H y K del Ca II.

2.1.3. GREGOR

GREGOR (Schmidt et. al. 2012) es un telescopio de tipo Gregory con un primario de 1,5 m de abertura, instalado en el Observatorio del Teide, en la isla de Tenerife. Es un telescopio alemán gestionado por el Kiepenheuer Institut für Sonnenphysik (KIS), de Friburgo (Alemania), y el Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS), de Gotinga (Alemania).

El telescopio dispone de un sistema de óptica adaptativa (Berkefeld et al. 2012) de alto orden que utiliza un espejo deformable con 256 actuadores y un sensor de frente de onda Shack-Hartmann con 156 subaberturas de 10 cm cada una. El telescopio también cuenta con un sistema de óptica adaptativa multiconjugada pero aún no se encuentra operativo. GREGOR dispone de una unidad de calibración polarimétrica que se encuentra en el haz simétrico del telescopio, cerca del foco secundario (Hofmann et al. 2012), con lo que puede ser usado por todos los instrumentos del plano focal. Se dispone de dos conjuntos de polarizadores y retardadores para el visible y el IR. El objetivo radica en alcanzar una sensibilidad polarimétrica de 10⁻⁴. El telescopio cuenta con la siguiente instrumentación posfocal.

2.1.3.1. GRIS

El GRating Infrared Spectrograph (GRIS; Collados et al. 2012) es un espectropolarímetro de red cuya modulación polarimétrica se hace mediante cristales líquidos ferroeléctricos y su análisis polarimétrico se realiza con un divisor de haz polarizante, montados detrás de la rendija del espectrógrafo. GRIS cubre el rango de longitudes de onda entre 1000 y 2200 nm, el cual incluye las conocidas bandas a 1083 nm, con el triplete del He I y una línea de Si I, y a 1565nm con su famosa línea con 3 de factor de Landé. El poder resolutivo del espectrógrafo oscila entre $\lambda/\Delta\lambda$ =190000 y 87000 a ambos extremos del rango espectral.

Recientemente, el IAC ha desarrollado una unidad de campo integral especialmente acoplada para GRIS. La unidad está basada en un rebanador de imágenes, que divide una determinada región de 2D en finas rebanadas y las recoloca, mediante una óptica dedicada, una al lado de la otra formando una rendija equivalente con la que se ilumina el espectrógrafo. La unidad se ha puesto a disposición de todos los usuarios de GREGOR desde septiembre de 2017, siendo el primer instrumento de uso común que usa una unidad de campo integral que se opera de manera regular en un telescopio solar. Estos desarrollos son de gran importancia para definir los espectrógrafos de nueva generación que se instalen en EST (véase la Sección 2.3.2).

Figura 5. Mancha solar medida con la unidad de campo integral instalada en el espectrógrfo GRIS de GREGOR. De izquierda a derecha y de arriba abajo, se representan la intensidad del continuo y las imágenes monocromáticas en un punto del ala de la línea de Fe I 1565 nm (g=3). El instrumento permite medir el espectro completo de polarización, un rango de 4 nm.





Figura 6. Mancha solar dentro de la región activa AR 111504 observada a un ángulo heliocéntrico de coseno 0,72, el 17 de junio de 2012 a la longitud de onda de 590 nm con el instrumento BBI del telescopio GREGOR. Imagen de Schmidt et al. (2012).

2.1.3.2. GFPI

El GREGOR Fabry-Pérot Interferometer (GFPI; Puschmann et al. 2012) está constituido por dos etalones en configuración colimada y un polarímetro en su denominado canal de banda estrecha. Puede trabajar a longitudes de onda más cortas que Ha. Además, cuenta con un canal de imagen en banda ancha y otro canal de imagen en el azul. Los canales de banda estrecha y banda ancha pueden alternarse y ofrecer anchuras a media altura de sus perfiles de transmisión de 0,3-0,8 nm y 10 nm, respectivamente. El sistema polarimétrico consiste en dos cristales líquidos ferroeléctricos y dos divisores de haz polarizantes que suministran ambas componentes polarizadas ortogonales a la misma cámara, proporcionando un campo de visión de 25"×38".

2.1.3.3. BBI

El Broad-Band Imager (BBI; von der Lühe et al. 2012) está diseñado para obtener imágenes de banda ancha (de unos cuantos nm) a longitudes de onda del visible hasta 390 nm con un campo de visión de 120"×80" y con un tamaño de píxel que permita alcanzar el límite de resolución espacial del telescopio a esas longitudes de onda.

2.2. Instrumentos espaciales ya disponibles

Entre los instrumentos solares espaciales disponibles podemos destacar el satélite japonés *Hinode* (Kosugi et al. 2007) y el americano *Solar Dynamics Observatory* (SDO; Hathaway and SDO SDT Panel 2001).

2.2.1. Hinode

Describir todas las características de la misión, el satélite y toda la instrumentación exceden el objetivo de este artículo. Solo gueremos hacer referencia aguí al instrumento posfocal más importante hasta la fecha que ha utilizado la comunidad española. Este es, sin duda, el espectropolarímetro (SP, Lites et al. 2001) que se encuentra instalado en el foco del telescopio óptico de 0,5 m de abertura. El espectropolarímetro consta de tres partes fundamentales: el modulador de polarización, el espectrógrafo y el analizador polarimétrico. El primero consiste en una lámina cristalina que imprime un retardo de 856 nm entre los dos estados ortogonales de polarización. Cementado a dos substratos en cuña de sílice fundido, el dispositivo rota con una frecuencia de 5/8 Hz, produciendo así una combinación lineal de los parámetros de Stokes dependiente del tiempo (modulada). Las cuñas y los recubrimientos antirreflejantes evitan la formación de franjas e imágenes fantasmas. El espectrógrafo presenta una configuración Littrow fuera de eje optimizada para 630 nm.

La anchura de la rendija es de 12 μ m, igual al espaciado entre píxeles del detector. La red de difracción es *echelle* de 79 líneas/mm y trabaja en el orden 36 para producir el espectro del famoso par de líneas de Fe I a 630 nm con una escasísima contaminación polarimétrica. Por último, el analizador de polarización es una lámina de Savart de calcita que divide el haz en dos ortogonalmente



polarizados y los dirige a sendas zonas de la cámara CCD. El uso simultáneo de ambos estados de polarización minimiza el diálogo entre los distintos parámetros de Stokes como consecuencia de movimientos residuales de la imagen.

2.2.2. Solar Dynamics Observatory

Como ocurre en el caso de *Hinode*, nos centramos aquí en el Helioseismic and Magnetic Imager (HMI; Scherrer et al. 2012, Schou et al. 2012), el cual está diseñado para proporcionar imágenes estabilizadas del disco solar completo con un segundo de arco de resolución de la velocidad a lo largo de la línea de visión, del flujo magnético a lo largo de la línea de visión y del continuo con una cadencia de 45 s, y del vector campo magnético cada 90 o 135 s, dependiendo del modo elegido. Las imágenes ocupan al completo la cámara de 4096×4096 píxeles, con un muestreo de 0,5"/px. Estos mapas se obtienen a partir de imágenes polarizadas de banda estrecha en el seno de la línea de Fe I a 617,3 nm. HMI recibe la luz solar a través de un filtro de 5 nm de ancho de banda (rechazando así la mayor parte de la luz incidente) al que sigue un telescopio refractor de 14 cm de abertura. Entre el telescopio y el filtro sintonizable se encuentran dos mecanismos de foco o calibración, tres de selección polarimétrica y un espejo ágil que constituye el sistema estabilizador de imagen. El filtro sintonizable consta de una lente telecéntrica, un filtro bloqueante, un filtro de Lyot con un solo elemento sintonizable, una lente de control del haz, dos interferómetros de Michelson y por fin óptica reimaginadora. La anchura a media altura del perfil de transmisión es de 7,6 pm. Tras el filtro se encuentra un divisor de haz que alimenta dos cámaras CCD en el plano focal. El mecanismo selector de polarización consta de tres láminas retardadoras rotantes con retardos nominales de 10,5, 10,25 y 10,5 λ . Dicho mecanismo tiene una redundancia tres por dos, de forma que una de las láminas puede eventualmente permanecer fija sin que la modulación de la polarización se resienta por usar solo las otras dos.

Figura 7. Magnetograma de HMI obtenido el 6 de junio de 2018 a las 07:00 UT. Los colores amarillo y verde corresponden a las dos polaridades del campo magnético. Obtenida de http://jsoc.stanford.edu. Cortesía de NASA.



Figura 8. Esquema de DKIST. Imagen obtenida de https://dkist.nso.edu/sites/atst.nso.edu/files/images. Cortesía de National Solar Observatory /AURA /NSF.

2.3. Nuevos instrumentos terrenos en desarrollo y construcción

2.3.1. Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST)

El Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST) es un telescopio solar de 4 m de abertura diseñado con el fin de responder a numerosos problemas científicos. Su diseño fuera de eje le permite evitar (por encima del 10 %) la luz difusa producida por la araña del secundario y obtener así óptimas observaciones coronales y de manchas en el infrarrojo térmico. Tiene un campo de visión de 5 minutos de arco, un rango espectral entre 300 y 35000 nm, una resolución espacial del orden de 0,1" con óptica adaptativa y una sensibilidad polarimétrica de 10⁻⁴. El telescopio está siendo erigido en el observatorio de Haleakala, en la isla hawaiana de Maui, bajo la dirección del National Solar Observatory. DKIST va a ofrecer un completo conjunto de instrumentos de vanguardia con capacidades bien de imagen o de espectroscopía y espectropolarimetría. Los instrumentos de primera luz se describen brevemente en los siguientes parágrafos.

2.3.1.1. Cryogenic Near-Infrared Spectro-Polarimeter (Cryo-NIRSP)

Liderado por la Universidad de Hawái, Cryo-NIRSP será un espectropolarímetro criogénico de rendija que permitirá observaciones tanto coronales (hasta 1,5 radios solares) como sobre el disco hasta 4700 nm. Su campo de visión es de 5' (redondo) para observaciones fuera del disco y sin cobertura del limbo solar, de 4'×3' para objetos próximos al limbo ---me-diante el uso del ocultador del limbo en el foco Gregory del telescopio- y de 2' (cuadrado) para objetos sobre el disco. El muestreo a lo largo de la rendija es de 0,12"/px y el ancho de la rendija es bien de 0,15", bien de 0,5", dependiendo nominalmente de si la observación se lleva a cabo en el disco o en la corona. La longitud de la rendija es de 4' para observaciones coronales y de 120" para las del disco. Además cuenta con un imaginador de contexto, centrado en la rendija, con un campo de visión de 100"×100".

2.3.1.2. Diffraction-Limited Near-Infrared Spectro-Polarimeter (DL-NIRSP)

Construido igualmente por la Universidad de Hawái, DL-NIRSP es un espectropolarímetro bidimensional alimentado por fibras ópticas. Tiene un campo de visión cuadrado de 2' y está construido sobre un espectrógrafo de campo integral, en configuración Littrow, fuera de eje, con tres brazos, cada uno para una banda espectral. Tiene dos formatos de IFU: 80×60 (píxeles de 36 μ m) o 60×40 (píxeles de 72 μ m). La resolución espectral es seleccionable desde el límite de difracción a 900 nm hasta 0,5" de muestreo. El análisis polarimétrico puede ser completo (los cuatro parámetros de Stokes) o suprimido (solo intensidad) y su objetivo de sensibilidad polarimétrica es mejor que 5.10⁻⁴ l_a. Puede observar en paralelo con VBI, VISP y VTF (las siglas se explican seguidamente) mientras que todos utilizan el sistema de óptica adaptativa.

2.3.1.3. Visible Broadband Imager (VBI)

Construido por el NSO, el imaginador visible de banda ancha VPI es un filtro que proporciona imágenes de alta resolución espacial y temporal en el rango de longitudes de onda entre 390 y 860 nm. En concreto, tiene dos canales: uno entre 393,3 y 486,4 nm (el canal azul) y otro entre 656,3 y 705,8 nm (el canal rojo). El primer canal tiene un campo de visión de 45" y el segundo de 69", mientras que cuando se integra todo el rango visible presenta un campo de 2'. Se pueden obtener series temporales con una cadencia de 3,2 s para imágenes reconstruidas con el mismo campo de visión y en una o varias longitudes de onda; de 0,033 s para imágenes originales (sin reconstruir) con el mismo campo, pero en una sola longitud de onda; y de 0,366 s para imágenes sencillas con el mismo campo y a distintas longitudes de onda. El canal azul ofrece una resolución espacial de 0,022" y el rojo de 0,034", con muestreos de la mitad de dichas cifras.

2.3.1.4. Visible Spectropolarimeter (VISP)

Construido por el High Altitude Observatory (HAO; Boulder, CO), VISP es un espectropolarímetro de rendija y de doble haz (especialmente diseñado para polarimetría de alta precisión). Puede observar hasta tres líneas simultáneamente en el rango entre 380 y 900 nm (aunque intentan extenderlo hasta 1600 nm). Es reconfigurable rápidamente: 10 min para una línea (el objetivo es 3 min para todas). Puede proporcionar campos de visión cuadrados de 2' con una resolución espectral mejor que 180.000 en 630 nm y con una resolución espacial de 0.07". En 10 s obtiene una sensibilidad polarimétrica de 10⁻³ l_c.

El IAA-CSIC está preparando INFACT (INversion FAC-Tory) para este instrumento. Se trata de dispositivo electrónico especialmente diseñado para la inversión ultrarrápida de la ecuación de transporte radiativo bajo la suposición de un modelo Milne-Eddington para proporcionar mapas casi en tiempo real del vector campo magnético y la velocidad a lo largo de la línea de visión. Es una herramienta inédita en los telescopios terrenos y que se basa en nuestro desarrollo primitivo para el instrumento SO/PHI (véase más abajo) para la misión *Solar Orbiter* de la ESA. Junto al instrumento VTF (siguiente parágrafo), son las dos únicas aportaciones europeas al telescopio americano.

2.3.1.4. Visible Tunable Filter (VTF)

Construido por el KIS, VTF es un instrumento de imagen espectroscópica o espectropolarimétrica de alta resolución espacial basado en un interferómetro Fabry-Pérot dual. Puede trabajar entre 520 y 870 nm con una resolución espectral de 6 pm (muestreados a la mitad) con un campo de 60"×60" y una relación señal a ruido de 650. Tiene una resolución espacial de 0,028" (muestreados a la mitad) en 600 nm. La resolución temporal es de 13 s para imágenes con polarimetría vectorial —con una sensibilidad de $3 \cdot 10^{\cdot 3}$ l_c—, de 4 s para el barrido de una línea en tacografía y de tan solo 0,8 s para el barrido de una línea en intensidad.

2.3.2. European Solar Telescope (EST)

EST representa la apuesta europea más ambiciosa para disponer de un telescopio de gran abertura para satisfacer las necesidades de la física solar de este siglo. El proyecto está liderado por España, conjuntamente con Alemania, y en él participan instituciones científicas de 17 países de Europa. Desde 2007, el IAC ha sido la entidad coordinadora del proyecto. Un hito fundamental para EST ha sido su inclusión en la hoja de ruta de ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures) como infraestructura estratégica europea. Si todo va bien, se espera la primera luz para 2027.

EST es un telescopio de 4 metros de abertura cuya principal objetivo científico es el estudio del acoplamiento magnético de la capas más profundas de la atmósfera solar, la fotosfera y la cromosfera. Su diseño está especialmente pensado para alcanzar la máxima resolución angular con la mejor precisión polarimétrica. Para ello cuenta con un telescopio en eje, con simetría de revolución, que no modifica el estado de polarización de la luz. El resto del sistema



óptico, hasta los instrumentos, responde a lo que se denomina "un diseño compensado polarimétricamente". La luz cambia su estado de polarización cuando incide de manera oblicua sobre un espejo, lo que dificulta en gran medida la detección y cuantificación de las sutiles señales de polarización introducidas por el campo magnético en la radiación solar. Los diversos espejos de EST están ubicados de tal manera que la polarización inducida por uno de ellos es inmediatamente compensada por el espejo siguiente, al introducir la polarización opuesta. Con ello se consigue que los instrumentos de EST reciban la radiación con su polarización solar original. Gracias a este diseño, EST espera alcanzar una precisión polarimétrica de 10⁻⁵ l_c.

EST dispondrá, desde primera luz, del sistema de óptica adaptativa más ambicioso hasta ahora diseñado para un telescopio de tierra. Para ello cuenta con cinco espejos deformables en su camino óptico. La atmósfera terrestre perturba los frentes de onda que nos llegan de los objetos celestes y degrada la calidad de las imágenes que se ven a través de los telescopios ubicados en tierra. La óptica adaptativa palia esta dificultad con el uso de espejos deformables, espejos cuya forma es variada de manera controlada a frecuencias del orden de 1 kHz para adaptarse y compensar la distorsión introducida por la turbulenta atmósfera terrestre incluso en los mejores observatorios.

Otra característica importante del diseño de EST es que su óptica de transferencia (la parte que se encarga de llevar la luz desde el telescopio en sí mismo hasta los instrumentos) actúa como un derrotador óptico que permite mantener una orientación fija de la imagen solar. Como consecuencia de ello, los instrumentos no necesitan una plataforma móvil y pueden instalarse en un laboratorio fijo de grandes dimensiones, con lo que se puede instalar un mayor número de ellos que trabajen de manera simultánea y sincronizada. Con ello será posible estudiar la propagación de los fenómenos magnéticos a través de las diferentes capas solares con mayor precisión.

EST contará con tres tipos de instrumentos, cuyas prestaciones finales están todavía por concretar: instrumentos de banda ancha que operan en longitudes de onda fija (con un ancho de banda que puede variar entre alguna décima y varios Angstroms), espectropolarímetros sintonizables basados en filtros de banda estrecha (etalones, con anchos de banda del orden de algunas decenas de Angstroms) y espectropolarímetros de red de difracción. De especial relevancia es que estos últimos estarán dotados con unidades de campo integral (hasta ahora no usuales en física solar). Con ellas se podrá obtener simultáneamente el espectro de todos los puntos de un determinado campo bidimensional de la superficie solar. En los últimos años se han realizado progresos significativos en esta dirección y se han instalado prototipos que utilizan bien microlentes (en el Telescopio Solar Sueco) bien rebanadores de imagen (en GREGOR). Las dos opciones han dado lugar a resultados muy esperanzadores y se pondrán de manera permanente en estos telescopios para obtener experiencia con su uso y ayudar a definir mejor las prestaciones necesarias para EST.

2.4. Nuevos instrumentos aeroespaciales en desarrollo y construcción

2.4. Solar Orbiter (SolO)

Con el objetivo primordial de responder a la pregunta crucial de la heliofísica, **¿cómo crea el Sol la heliosfera y la controla?**, la misión *Solar Orbiter* de la ESA, en colaboración con la NASA, proporciona unas capacidades observacionales sin precedentes tanto en lo que respecta a la combinación —hasta ahora inédita— de instrumentos de sondeo remoto y de medida local como al diseño de su especial órbita que logra un perihelio de 0,28 UA (la distancia media del planeta Mercurio respecto al Sol) y una elevación de 30° con respecto al plano de la eclíptica. Este objetivo científico principal se puede descomponer en cuatro preguntas más específicas que constituyen las cuestiones fundamentales que la misión tratará de ayudar a dirimir:

- ¿Cómo gobiernan los fenómenos transitorios solares las variaciones de la heliosfera?
- ¿Cómo y dónde se forman el viento y el campo magnético heliosféricos?
- ¿Cómo se producen las partículas energéticas que pueblan la heliosfera en las erupciones solares?
- ¿Cómo funciona la dinamo solar y gobierna las conexiones entre el Sol y la heliosfera?

Para contestar estas preguntas, es muy importante el concurso de instrumentos de medida local, esto es, aparatos que midan las propiedades de los campos, las ondas y las partículas energéticas del plasma del viento solar según lo encuentra la nave. Además, estas medidas deben tomarse suficientemente cerca del Sol para que sus propiedades no se hayan visto alteradas por fenómenos de transporte. Como el origen de estos campos, ondas y partículas radica en el propio Sol, también resulta primordial el concurso de instrumentos que observen nuestra estrella a distancia con medidas fotométricas, espectroscópicas y espectropolarimétricas.

Dado que gran parte de las claves de los ciclos solares están ligados a la actividad en los polos que nos es difícilmente accesible (el eje de rotación del Sol se inclina como máximo unos 7º con respecto a la normal a la eclíptica), la posibilidad de elevarse con respecto a la eclíptica ofrece una perspectiva inédita de estos polos y por tanto promete nuevos hallazgos. La combinación de instrumentos de sondeo remoto y de medida local no tiene precedentes y, consiguientemente, hace albergar buenos augurios de nueva ciencia por descubrir con la misión. En los momentos de máximo acercamiento, la rotación relativa entre la nave y el Sol es significativamente menor que la observada desde la Tierra v. por tanto, proporcionará igualmente una perspectiva inédita más libre de los efectos geométricos de perspectiva asociados a dicha rotación. Por otro lado, la especial órbita de la nave permitirá dos nuevos modos de observación: polarimetría vectorial estereoscópica y observación de la cara oculta del Sol. La primera se refiere a la observación espectropolarimétrica de un determinado objeto solar desde dos puntos de vista (la Tierra o sus cercanías y la nave Solar Orbiter). Ello permitirá intercalibrar los instrumentos ahora disponibles con los que vuelan en la nave y, aún más importante, desambiguar el azimut del campo magnético que por las propiedades del efecto Zeeman en las líneas espectrales no nos es posible distinguir entre dos valores separados 180°.

Dirigimos al lector interesado hacia el denominado "libro rojo" de la misión el "Definition Study Report" que se puede encontrar en http://sci.esa.int/solarorbiter/48985-solar-orbiter-definition-study-reportesa-sre-2011-14/.

Pasamos a continuación a describir muy brevemente los distintos instrumentos a bordo de la misión.



2.4.1.1. Instrumentos de medida local

Solar Wind Analyser (SWA)

SWA es realidad un conjunto de tres sensores (de electrones -EAS-, de protones y partículas alfa -PASy de iones pesados -HIS-) y una unidad común de procesamiento de datos. Pretende caracterizar completamente el viento solar entre 0,28 y 1,4 UA. En concreto, SWA medirá la función de distribución de la velocidad tridimensional de los constituyentes principales del viento: protones, partículas alfa y electrones. Se necesitan conocer los momentos básicos de esas distribuciones, como la densidad, la velocidad, la temperatura del sensor y el vector flujo de calor, para conocer el estado fluido y cinemático del viento. SWA está liderado por el MSSL-UCL en el Reino Unido, con contribuciones italianas, francesas y norteamericanas.

Energetic Particle Detector (EPD)

EPD consiste en cuatro sensores que comparten una unidad de procesado de datos y una fuente de alimentación de bajo voltaje. Debe medir la composición, la cadencia y las funciones de distribución de las partículas energéticas y supratérmicas. EPD cubre el rango de energías justo por encima del viento solar (unos pocos keV por nucleón) hasta electrones relativistas o iones de alta energía (100 MeV por nucleón para protones y 200 MeV para iones pesados). La finalidad de los cuatro sensores se describe a continuación.

STEP (SupraThermal Electrons and Protons) está encargado de medir electrones y protones (o iones) con energías supratérmicas en el rango entre 3 y 65 keV. Tiene dos canales en uno de los cuales un campo magnético deflecta por completo los electrones y en el otro no. De esta forma se puede distinguir entre electrones y protones (iones) en los rangos correspondientes de energía. Como los flujos de electrones supratérmicos son órdenes de magnitud inferiores a los del viento solar o del halo, STEP es el único sensor que puede medirlos con gran cadencia.

EPT (Electron Proton Telescope) está diseñado para separar electrones en el rango entre 20 y 400 keV de los protones entre 60 y 7000 keV. EPT cubre así, con un poco de solapamiento, el hueco entre las medidas de STEP y HET. EPR y HET comparten dos cajas electrónicas comunes y, físicamente, aparecen como dos conjuntos EPT/HET. HET (High-Energy Telescope) mide electrones, protones e iones pesados. Los primeros, entre 300 keV y 20 MeV; los segundos, entre 10 y 100 MeV; y los terceros entre ~ 20 y 200 MeV por nucleón. Permite una separación de isótopos de He de forma que logra la razón ³He/⁴He mejor que un 1 %. HET cubre las energías relevantes para estudios del clima espacial y proporcionará claves para entender el origen de sucesos de altas energías en el Sol que eventualmente aceleran las partículas a energías con las que pueden penetrar la atmósfera de la Tierra.

SIS (Suprathermal Ion Spectrograph) identifica partículas por espectrometría de masas por la técnica de tiempo de vuelo. Proporciona observaciones de iones entre el He y el Fe con energías comprendidas entre ~ 100 keV por nucleón y 10 MeV por nucleón. Está formado por dos telescopios con orientación hacia y en contra del Sol respectivamente que comparten una caja electrónica.

El conjunto de instrumentos EPD está liderado por la Universidad de Alcalá, en España, y coliderado por la Universidad Christian Albert, de Kiel, Alemania, y tiene contribución norteamericana y europea (bajo responsabilidad de la ESA).

Magnetometer (MAG)

Como su propio nombre indica, MAG proporcionará medidas directas del campo magnético local de la heliosfera. Se basa en dos magnetómetros de puerta de flujo que se montan en una de las antenas desplegables de la nave. Mide el campo magnético vectorial 16 veces por segundo en modo nominal o 128 veces en modo ráfaga. Está construido por el Imperial College, de Londres.

Radio Plasma Wave (RPW)

Mide los campos eléctrico y magnético con alta velocidad a fin de determinar con alta resolución las características de las ondas electromagnéticas y electrostáticas del viento solar desde 0 hasta 20 MHz. Aunque en el grupo de los instrumentos de medida local, RPW también realiza sondeo remoto. Consta de tres unidades: el receptor de baja frecuencia (entre 0 y 10 kHz), que proporciona la forma de ondas y su espectro de potencia en ese rango de frecuencias; el receptor de ruido térmico y de alta frecuencia (de varias formas entre 4 kHz hasta 20 MHz), que determina las propiedades de la población ambiental electrónica mediante medidas del ruido térmico local alrededor de la frecuencia del plasma y detecta remotamente emisiones radio solares; y el *muestreador* en el dominio temporal, que digitaliza las ondas eléctricas y magnéticas en el rango de frecuencias entre 100 Hz y 250 kHz.

RPW está liderado por el LESIA en el Observatorio de Paris-Meudon, en Francia y cuenta con contribuciones checas.

2.4.1.2. Instrumentos de sondeo remoto

Extreme Ultraviolet Imager (EUI)

EUI es un instrumento de imagen en el ultravioleta. Consta en realidad de tres imaginadores: uno de disco entero (Full Sun Imager; FSI) y dos de alta resolución (HRI: el canal de Lyman α y el del UV extremo). FSI monitoriza el disco completo en dos canales a su vez: el frío y el caliente (17,4 y 30,4 nm, respectivamente). Lo hace en un campo de 3,8° (dos diámetros solares) con una resolución espacial de 9" y con una cadencia de 600 s. Por su parte, los HRI tienen un campo de visión de 0,28°, con una resolución espacial de 1" y cadencias bien mayores o menores que 1 s.

EUI está liderado por el Observatoire Royal de Belgique (ORB) y cuenta con contribucioines del Physikalisch Meteorologisches Observatorium Davos / World Radiation Center, de Davos (Suiza), del MSSL-UCL, del Reino Unido, del IAS, de Orsay, Francia, y del MPS, Alemania.

Spectrometer/Telescope for Imaging X-rays (STIX)

Este instrumento proporciona imagen espectroscópica de la emisión térmica y no térmica del Sol en rayos X desde 4 a 150 keV. Suministra información cuantitativa sobre la cadencia, la localización, la intensidad y el espectro de electrones acelerados, así como de los plasmas de alta temperatura fundamentalmente asociados a las fulguraciones. El instrumento se compone de tres elementos mecánicamente desacoplados: las bocinas



Figura 11. Modelo de vuelo de la unidad óptica de PHI.

productoras de sombra para limitar el flujo solar óptico e infrarrojo que llega al instrumento y además absorben gran parte del flujo de rayos X de baja energía que alterarían la vida media de los detectores; el imaginador que, a su vez, consiste en 64 subcolimadores, cada uno de los cuales constituido por un par de rejillas ampliamente separadas que sirven para identificar la dirección de los rayos X incidentes a fin de reconstruir la imagen de la fuente a diferentes energías; y el espectrómetro que usa 64 detectores planos discretos de Cd, Zn y Te que proporcionan una buena resolución en energía.

STIX está liderado por la Universidad Northwestern de Ciencias Aplicadas y Artes suiza.

Spectral Imaging of the Coronal Environment (SPICE)

SPICE es un espectrógrafo imaginador en el UV extremo diseñado para caracterizar las propiedades de la corona solar. Se trata de un telescopio parabólico (de un único elemento) fuera de eje y un espectrógrafo de red toroidal con espaciamiento entre líneas variable más dos detectores intensificados APS. La unidad de procesamiento de datos controla todos los mecanismos, realiza la compresión de datos y proporciona la interfaz con la nave. La imagen del espejo parabólico fuera de eje se forma en la montura de la rendija del espectrógrafo. La red de difracción cóncava forma el espectro de dos regiones espectrales en los dos detectores, los cuales cubren la misma zona espacial sobre el Sol. SPICE produce espectroheliogramas (imágenes espectrales) de la intensidad de ciertas líneas espectrales seleccionadas que barren el rango de temperaturas y alturas desde la cromosfera hasta la corona. Trabaja en las siguientes longitudes de onda: 70,2-79,2 nm (banda 1), 97,2-105 nm (banda 2) y 48,5-52,5 nm (segundo orden).

SPICE es un instrumento responsabilidad de la ESA que lo proporciona como instrumento de la propia instalación y no como carga de pago.

Multi Element Telescope for Imaging and Spectroscopy (METIS)

METIS realiza imágenes en polarización de la corona visible K en banda ancha e imágenes de la corona UV (H I Ly α , 121.6 nm) y EUV (He II Ly α , 30,4 nm) en banda estrecha para estudiar la estructura y dinámica de la corona completa con una cobertura temporal y resolución espacial sin precedentes. También realiza

espectroscopía de las líneas H I y He II Ly α de una porción de su campo de visión para estudiar la distribución de velocidades de las partículas a lo largo de la línea de visión. METIS es un coronógrafo ocultado externamente con un campo de visión anular entre 1,5 y 3 R_o a una distancia de 0,28 UA. Esta región es fundamental para vincular los fenómenos atmosféricos solares con la evolución de la heliosfera interna. El telescopio es relativamente complejo de describir por su labor coronográfica, pero en definitiva se trata de un telescopio Gregory en eje. El canal visible incorpora un polarímetro basado en retardadores ópticos de cristal líquido (LCVR)4. METIS porta dos detectores, uno para el visible (500 - 600 nm) y otro para el UV (121,6 nm) y el EUV (30,4 nm). El camino UV/EUV incorpora un espectrómetro de varias rendijas que se alimenta con tan solo un sector del espejo primario y la red de difracción (esférica) hace de secundario.

METIS está liderado por el Osservatorio Astronomico di Torino / INAF, en Italia y tiene contribuciones alemanas y checas.

Solar Orbiter Heliospheric Imager (SoloHI)

SoloHI producirá imágenes del flujo casi estacionario y de las perturbaciones transitorias del viento solar en un amplio campo de visión, tras observar la luz visible dispersada por los electrones del viento solar. Las preguntas que SoloHI pretende contestar tienen que ver con la aceleración de partículas solares energéticas, mediante imágenes de eyecciones de masa coronal (CME) y los choques que estas ocasionan; la evolución de CME y regiones corrotantes de interacción de la heliosfera interna; y el origen y evolución del viento solar, mediante medidas remotas de la estructura y turbulencia de los flujos de dicho viento. Sus 40° x 40° de campo de visión están centrados en el plano de la eclíptica, pero están separados por 5º del centro del Sol y proporcionan imágenes sinópticas de la heliosfera interna con buena resolución espacial. Consta de dos unidades: el módulo del instrumento (SIM) y la electrónica de control. El telescopio consiste en una lente gran angular de 1,53 cm². El SIM está situado justo detrás del escudo calorífugo y una serie de pantallas elimina la luz difusa solar.

SoloHI está liderado por el Naval Research Laboratory norteamericano.

Polarimetric and Helioseismic Imager (PHI)

PHI (o SO/PHI) es un magnetógrafo solar que obtiene imágenes limitadas por difracción, que realiza un análisis completo de la polarización, que hace espectroscopía y que, además, alberga un sofisticado sistema de procesamiento a bordo. PHI produce mapas bidimensionales de las tres componentes del vector campo magnético solar, de la velocidad a lo largo de la línea de visión, acompañadas de imágenes del continuo, con una cadencia de un minuto. Las imágenes se consiguen mediante dos telescopios alternativos, uno de disco entero (FDT) y otro de alta resolución (HRT). El primero proporciona una imagen circular de 1º de diámetro con una resolución de $\lambda/D = 7,3"$ y el segundo forma una imagen rectangular de una zona del Sol de unos 0,14°, con una resolución de $\lambda/D = 0,9$ " que, a la distancia del perihelio, es equivalente a una resolución espacial de 0,3" desde la Tierra. Para asegurar la resolución espacial frente a los posibles efectos nocivos de vibraciones residuales y defectos de puntería de la nave, el instrumento cuenta con un sistema estabilizador de imagen (ISS) con una cámara específica que recibe parte de la radiación solar. El ISS deduce por correlación entre la imagen viva y otra de referencia las correcciones que aplicar para corregir esos movimientos residuales y envía la señal correspondiente a un espejo ágil que, en tiempo real, corrige la imagen científica. El ISS solo actúa cuando el telescopio en funcionamiento es el HRT.

Figura 12. Modelo de vuelo de la unidad electrónica de PHI.



El análisis polarimétrico se efectúa con un paquete (PMP) para cada telescopio que cuenta con un modulador con dos LCVR y un analizador que es un polarizador lineal. Esos tres elementos van ensamblados en un único paquete que facilita su control de actuación, así como su estabilidad en temperatura (mejor que 0.5 °C durante el periodo de observación). El análisis espectral se realiza con un filtro previo de menos de 1 nm de ancho de banda y un interferómetro Fabry-Pérot hecho con un etalón sólido de LiNbO₃, que proporciona un perfil de transmisión con una anchura a media altura de 10 pm.

Las imágenes cuasimonocromáticas y polarizadas se registran en el detector CMOS del instrumento de 2048 x 2048 px. En el modo nominal, la línea espectral de Fe I a 617,3 nm se barre en cinco posiciones en longitud de onda más otra del continuo adyacente. En cada longitud de onda se han de tomar cuatro imágenes polarizadas para completar el análisis polarimétrico vectorial. Así pues, un conjunto observacional, obtenido en menos de un minuto, consta de 24 imágenes de 4 Mpx. Como resulta fácil de comprender, las condiciones de la órbita de Solar Orbiter, con distancias a la Tierra enormes y periodos eventuales en los que el Sol se encuentra entre la nave y la Tierra, no permiten el envío telemétrico de los datos brutos. Ello forzó al equipo a desarrollar un sistema específico que realice un análisis científico a bordo y convierta esos datos brutos en las magnitudes físicas solares de interés. Este dispositivo, el inversor electrónico de la ecuación de transporte radiativo, está implementado en una de las FPGA que se encuentran en la unidad de procesamiento de datos.

PHI está liderado por el MPS, de Gotinga, Alemania, que tiene la responsabilidad de la unidad óptica, así como la global del instrumento, y coliderado por el IAA-CSIC que es responsable de la unidad electrónica y el cableado del instrumento, partes de la unidad electrónica, del inversor electrónico y de la compresión de datos. Además cuenta con contribución francesa del IAS, de Orsay. El IAA coordina la participación española, la cual incluye responsabilidades significativas como el FDT (INTA), los PMP, su cualificación espacial, así como la del etalón de LiNbO₃ (también del INTA), la ingeniería y el *hardware* térmico (UPM), la electrónica de la cámara del ISS (UB), la fuente de alimentación redundante, la caja electrónica y el simulador por software del instrumento (UV).

2.4.2. SUNRISE III

La misión Sunrise III se desarrolla tras el éxito científico de las dos ediciones anteriores de 2009 y 2013. El lector interesado puede dirigirse a Solanki et al. (2010) y a Barthol et al. (2010) para obtener una descripción detallada de la misión y sus componentes principales. El objetivo central de Sunrise III es mejorar nuestro conocimiento de la estructura y dinámica del campo magnético de la atmósfera solar y el acoplamiento entre sus capas inferiores, la fotosfera y la cromosfera. La interacción con los movimientos convectivos hace que el campo se intensifique en concentraciones a escalas por debajo de los 100 km, las cuales son de hecho cruciales para el balance dinámico y energético de la atmósfera solar. De hecho, tales concentraciones deben detectarse también en la cromosfera mediante la observación de líneas espectrales que son sensibles a las magnitudes físicas del material solar en esta capa. La motivación principal de Sunrise III es, pues, alcanzar la resolución espacial que nos lo permita. Ello precisa un cuidado especial en la calidad y la estabilidad de las imágenes.

La misión Sunrise III consiste en el lanzamiento desde Kiruna (Suecia) de un globo estratosférico con un telescopio de 1 m de abertura más su instrumentación posfocal suspendidos. Cuando se llega a la altitud de flotación (~ 37 km), el globo circunnavegará el polo Norte hasta llegar a la costa septentrional del Canadá donde la barquilla con su carga científica descenderá por medio de un paracaídas. El proyecto está liderado por el MPS, de Gotinga (Alemania). El MPS es responsable del telescopio (rehabilitado del anterior, originalmente construido bajo su supervisión por la empresa alemana Kaiser-Threde), la unidad de control y SUSI (Sunrise UV Spectropolarimeter and Imager), un espectropolarímetro ultravioleta de nueva factura. El KIS contribuye con el sensor de frente de onda y un espejo ágil para la corrección de imágenes por correlación en tiempo real. Los institutos alemanes van financiados por fondos propios en esta tercera edición. Los EEUU participan en el proyecto a través del Applied Physics Laboratory, de Laurel (Maryland). El APS aporta la barquilla con su sistema de alta estabilidad y precisión de puntería, financiado por la NASA. Esta, a través de su programa de vuelos de larga duración proporciona el globo, la logística desde Kiruna y en el sitio de aterrizaje. El Japón aporta la óptica y optomecánica de SCIP

(Sunrise Chromospheric Infrared Polarimeter), un espectropolarímetro infrarrojo que es responsabilidad del National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ), bajo la financiación parcial de la agencia espacial japonesa, JAXA. España participa con el magnetógrafo visible IMaX+ (Imaging Magnetograph eXperiment Plus) más la electrónica, el software, el equipo de apoyo en tierra y las cámaras de SCIP, bajo financiación de la Agencia Estatal de Investigación. El consorcio español está liderado por el Grupo de Física Solar (SPG) del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), e incluye al Instituto Nacional de Técnica Aerospacial (INTA), la Universitat de València (UV), el Instituto de Microgravedad Ignacio da Riva (IDR), de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC).

2.4.2.1. SUSI y SCIP

SUSI y SCIP serán dos espectropolarímetros basados en espectrógrafos echelle en configuración Littrow reflectiva. SUSI observará dos ventanas espectrales de aproximadamente 2,5 nm de ancho de banda en el UV cercano, entre 300 nm y 420 nm. SCIP, a su vez, lo hará con dos ventanas espectrales alrededor de 770 nm y 850 nm, las cuales contienen las líneas cromosféricas de K I D, y D, a 769,8 nm y 766,4 nm, respectivamente, y las líneas de Ca II a 849,8 nm y 854,2 nm. Ambos, SUSI y SCIP, tendrán una resolución espectral de alrededor de $\lambda/\Delta\lambda = 2.10^5$. Como se trata de espectrógrafos de rendija, todas las longitudes de onda se observan simultáneamente. Así pues, se preserva la integridad espectral. Ahora bien, para producir un mapa de la superficie solar, ambas rendijas deben barrer el área de interés. En los mapas resultantes, los puntos solares perpendiculares a la dirección de la rendija se observan en diferentes instantes de tiempo, con lo que se degrada su integridad espacial.

2.4.2.2 IMAX+

IMaX+ representa exactamente la aproximación alternativa. Forma imágenes bidimensionales en las cuales todos los puntos de la región de interés se observan simultáneamente. A cambio, la integridad espectral se deteriora puesto que el espectro se observa mediante barrido de las muestras en longitud de onda seleccionadas. IMaX+ será un magnetógrafo imaginador basado en filtros de banda estrecha (un filtro interferencial de banda estrecha más un etalón sólido de LiNbO₃ en doble paso) para el análisis espectral y en retardadores ópticos de cristal líquido para la modulación polarimétrica. Un divisor de haz cerca del plano focal dividirá las dos componentes polarizadas ortogonalmente enviándolas respectivamente a sendas cámaras. Proporcionará imágenes cuasimonocromáticas de combinaciones lineales de los cuatro parámetros de Stokes (polarimetría vectorial) sobre un campo solar de 64"×64". A partir de dichas imágenes, podremos obtener mapas de las tres componentes del campo magnético y de la velocidad a lo largo de la línea de visión del plasma solar, mediante la interpretación de la huella que dejan los efectos Zeeman y Doppler en la formación de las líneas espectrales. IMaX+ observará dos líneas espectrales: una del Fe I a 525,02 nm y otra, la del Mg Ib a 517,27 nm. La primera es una línea típicamente fotosférica y fue la observada en las dos primeras ediciones de la misión. La segunda es sensible a las magnitudes físicas de la alta fotosfera y la baja cromosfera. El conjunto, pues, proporcionará una información singular de la misma zona solar en ambas capas atmosféricas con una cadencia de 1 minuto aproximadamente. Será el único instrumento en el mundo de semejantes características.

Para asegurar la calidad de las imágenes, los efectos de la función de dispersión puntual (PSF) serán corregidos *post facto* con la ayuda de técnicas de diversidad de fase que incorpora el instrumento. La calidad en la reconstrucción de la PSF vendrá apoyada por el muestreo espacial de la señal. En nuestro detector, con la relación focal prevista, *F*60, el elemento de resolución espacial cae en casi tres (por tres) píxeles, bien por encima del criterio de Shanon. Ello ayudará a obtener mejor las altas frecuencias de la PSF.

3. LA FÍSICA SOLAR QUE VIENE

Lo primero que tenemos que tener en cuenta es que el Sol es un laboratorio de física básica en el que poder estudiar, y entender progresivamente, los fundamentos de la interacción entre el plasma y el campo magnético. En el Sol se dan unas condiciones físicas que no son reproducibles en laboratorio y es la única estrella en la que podemos estudiar esos fenómenos con detalle. En segundo lugar, no se nos puede olvidar que el Sol es la fuente de la vida en la Tierra y que cualquier cambio en sus propiedades puede afectar al entorno de nuestro planeta. Los dos aspectos deben ir mano a mano a la hora de investigar toda la fenomenología solar.

Sin ánimo de ser exhaustivos, y pecando necesariamente de ser subjetivos, a continuación reseñamos algunos de los objetivos científicos más relevantes para los próximos decenios. Estos ejemplos están preferentemente tomados de los requisitos científicos de EST y *Solar Orbiter*, y son también aplicables a otros proyectos como DKIST o *Sunrise* III.

3.1. Sol en calma

Cuando se observa el Sol en polarización circular (p. ej., el representado en la figura 7), se distinguen claramente diversas regiones con diferentes características. Por una parte, están las regiones activas, zonas extensas en las que las dos polaridades están claramente diferenciadas. En ellas aparecen las manchas solares y las fáculas. Fuera de estas regiones activas, en lo que se denomima tradicionalemente Sol el calma, la señal de polarización es más difusa y aparece delineando celdas unipolares, en lo que se denomina la red magnética fotosférica. El campo magnético es más intenso en los bordes de las celdas convectivas supergranulares. Visto en alta resolución, el campo magnético es discontinuo y está organizado en pequeños tubos (100 km, Howard & Stenflo 1972) o capas de flujo (flux sheets, Berger et al. 2004). Estas estructuras aparecen localizadas en los bordes de las celdas convectivas granulares, a menor escala, y supergranulares, a mayor escala. Su campo magnético es del orden de unos 1500 G, claramente por encima del valor del campo de equipartición (de unos pocos cientos de G), concentrables de manera natural por los movimientos convergentes del plasma fotosférico. A pesar de su pequeño tamaño, desempeñan un papel central para poder entender las sutiles variaciones de la irradiancia solar (tan importantes para nuestro planeta). Así mismo, son fundamentales para conectar energéticamente las diversas capas de la atmósfera solar ya que actúan como guías para propagar energía a lo largo de ellas.

El mecanismo más plausible propuesto para su formación es el denominado colapso convectivo

(Parker 1978; Spruit 1979). Tras ser concentrado el campo magnético por los movimientos convergentes convectivos, se desarrolla una inestabilidad que hace el material caiga y que la estructura magnética se vacíe, lo que conlleva de manera consiguiente a que se estreche como resultado del desequilibrio de presiones generado. La consecuencia inmediata es que el campo magnético se ve amplificado. Este proceso es muy difícil de detectar ya que ocurre en escalas espaciales muy pequeñas (100 km) y escalas temporales muy cortas (algunas decenas de segundos). La explicación final de la naturaleza y existencia de estas pequeñas estructuras está pues falta de confirmación observacional y son necesarios telescopios como EST o DKIST e instrumentos más potentes que los actuales, si bien ya hemos empezado a obtener pruebas con resultados de la misión Sunrise (p. ej., Lagg et al. 2010; Requerey et al. 2015, 2017).

La evolución a largo plazo de estas estructuras también es un problema. El aspecto general de la red fotosférica varía muy lentamente a escalas de horas/días, pero sus integrantes individuales están en constante movimiento e interacción mutua, juntándose, separándose, cancelándose entre ellos cuando son de distinta polaridad... Las observaciones de larga duración y calidad homogénea (como las suministradas por las misiones *Sunrise* o *Solar Orbiter*) ayudarán en gran medida a entender esta evolución.

El interior de las celdas delimitadas por la red fotosférica parecen vacías de campo magnético en los magnetogramas de sol entero. Sin embargo, las observaciones de alta resolución obtenidas en los dos últimos decenios han revelado la existencia de un magnetismo mucho más débil. En particular, se ha detectado la casi continua emergencia de flujo magnético a escala granular en forma de arcos (Centeno et al., 2007). Una fracción no despreciable de estos arcos, alrededor de un 25 % de ellos, llegan hasta alturas cromosféricas (Martínez González & Bellot Rubio 2009) y pueden ser un contribuyente esencial para el calentamiento de esta capa. Observaciones simultáneas multicapa, como las que permitirán la nueva generación de telescopios, serán esenciales para entender todas las implicaciones derivadas de estas estructuras.

Los polos son regiones del Sol en calma de particular interés. Se cree que desempeñan un papel central en la dinamo solar. A medida que el ciclo de actividad progresa, el flujo magnético remanente de las regiones activas se transporta por circulación meridional hacia latitudes altas donde se va acumulando y reemplaza el campo preexistente, dando lugar al cambio periódico (11 años, por término medio) de su polaridad. Entre otras razones, los polos son importantes porque la componente rápida del viento solar se genera en ellos. Las observaciones desde fuera del plano de la eclíptica que se realicen con *Solar Orbiter* y las medidas precisas del campo magnético con alta resolución de los grandes telescopios nuevos ayudarán a entender este proceso de cambio de polaridad, clave para explicar la naturaleza del ciclo solar.

3.2. Manchas solares

Las manchas solares son concentraciones de campo magnético a gran escala y la manifestación más evidente de la actividad solar. Su intenso campo magnético es capaz de suprimir la convección que calienta el Sol en calma y por esa razón son frías y aparecen oscuras cuando se las compara con el resto del disco.



Figura 13. Imagen de la granulación solar obtenida con el Telescopio Solar Sueco. A) Imagen en la banda G a 430,5 nm. B) Imagen tomada en CA II H 386,9 nm. C) Magnetograma obtenido en Fe I 630,25 nm. D) Máscara binaria para separar los elementos magnéticos. Imagen tomada de Berger et al (2004.)

A pesar de ser unos de los objetos más estudiados de la física solar, todavía siguen apareciendo problemas fundamentales, sobre todo asociados a su estructura fina. Entre ellos podríamos mencionar: (i) la existencia de puntos umbrales parece indicar la presencia de convección en la umbra (Schussler & Vogler, 2006; Ortiz et al. 2010); (ii) los puentes de luz que separan en cortas distancias diferentes núcleos umbrales y la penumbra presentan una actividad inusual en la alta atmósfera, presumiblemente como consecuencia de capas de corriente derivadas de las fluctuaciones de la topología del campo a escalas pequeñas que generan reconexiones localizadas (Katsukawa et al., 2007; Felipe et al. 2017); (iii) la posible existencia de magnetoconvección en la penumbra (Spruit & Scharmer 2006; Borrero et al 2017); y (iv) propagación de ondas acústicas, magnéticas y magnetoacústicas.

3.3. Cromosfera

La cromosfera es la capa que se sitúa entre la fotosfera y la corona y es relativamente difícil de estudiar en comparación con la fotosfera. Bajo un punto de vista teórico hay que tener en cuenta que en ella la dinámica del plasma pasa de estar gobernada por la presión gaseosa a serlo por el campo magnético. Además, el plasma se vuelve muy transparente (por su baja densidad) y ópticamente delgado y pasa de estar esencialmente en un estado prácticamente neutro (como ocurre en la fotosfera) a tener un apreciable grado de ionización. Así mismo, el equilibrio termodinámico local ya no es aplicable y la magnetohidrodinámica ya no es suficiente para describir la física.

Bajo un punto de observacional, la cromosfera presenta también una serie de dificultades intrínsecas: los tiempos de evolución característicos de los fenómenos cromosféricos son mucho más pequeños (segundos, típicamente); el campo magnético tiende a expandirse y debilitarse, lo que lo hace más difícil de detectar; la cromosfera está muy estratificada (las condiciones físicas varían órdenes de magnitud en solo 2000 km) y requiere la observación simultánea de varias capas con instrumentación especialmente diseñada para ello.

A pesar de estar íntimamente relacionada con la fotosfera, la cromosfera presenta un aspecto visual completamente diferente (véase, por ejemplo, la figura 14) y con unas características dinámicas muy distintas a la fotosfera.

Uno de los aspectos más intrigantes de la cromosfera es el aspecto fibrilar de casi todas las estructuras que se pueden identificar en esta capa, sólamente discernible en la mayoría de los casos con los mejores telescopios actuales.

En ella es también bastante común observar chorros de material. Los más abundantes son los que se conocen como espículas de tipo I y II (De Pontieu et al. 2007a,b). Las de tipo I son choques generados por ondas acústicas que se propagan a lo largo de las líneas de campo magnético. Tienen una anchura del orden de unos pocos cientos de kilómetros y una longitud de varios megametros. Las espículas de tipo II son más rápidas y menos alargadas y todavía no están explicadas de manera convincente. Se necesitan más y mejores observaciones para entender la naturaleza de este tipo de espículas.

Los filamentos son grandes estucturas compuestas por material cromosférico denso y frío inmerso en la corona, mucho más caliente y menos densa. Cuando se observan en el borde solar dan la impresión de nubes levitando por encima de la superficie y se los conoce como protuberancias. El campo magnético es el ingrediente fundamental para su formación y estabilidad. En ocasiones, la configuración magnética se vuelve inestable y los filamentos/protuberancias son eyectados al espacio exterior a grandes velocidades. Otro aspecto muy importante es su estructura fina. Las observaciones revelan que los filamentos (y las protuberancias) están compuestos por fibrillas muy estrechas y alargadas con una dinámica muy compleja. El material de las fibrillas puede estar moviéndose a gran velocidad o incluso oscilando como resultado de las fuerzas gravitacionales y magnéticas. La relación entre estas fibrillas y el campo magnético está aún por dilucidar. Los telescopios actuales no permiten determinar la topología del campo magnético y sus fluctuaciones con la suficiente precisión y resolución angular (Casini et al. 2003; Orozco Suárez et al. 2014; Martínez González et al. 2015). Así mismo, son desconocidas las condiciones que dan lugar a sus eyecciones, y que sin duda están relacionadas con perturbaciones a pequeña escala. Otro tema en el que los nuevos telescopios tendrán mucho que decir.



Figura 14. Arriba: Imagen tomada en el ala de la línea H α a 656.3 nm (arriba) en la que se observa la granulación fotosférica y estructuras brillantes asociadas a la presencia de campo magnético. Abajo: mismo campo observado en el centro de la línea en el que distingue claramente el aspecto fibrilar cromosférico. Las imágenes han sido obtenidas en el Telescopio Solar Sueco. Cortesía de J. De la Cruz Rodríguez.

10

0

Û

10

20

30

arcaeconda

40

50

60

3.4. Acoplamiento de la atmósfera solar por ondas

El sol genera de manera natural ondas acústicas con los movimientos convectivos turbulentos que se desarrollan debajo de la fotosfera. La energía contenida en estas ondas (Ulmschneider 1989) es suficiente para dar cuenta del calentamiento de las capas externas (cromosfera y corona). Pero, para que esto pueda ocurrir, se deben dar dos circunstancias. La primera es que las ondas alcancen esas capas. Este es un proceso complicado. En un medio claramente inhomogémeo como es el Sol, las ondas se refractan y se reflejan y siguen una trayectoria que es muy dependiente de las condiciones locales del plasma.

La presencia de estructuras magnéticas hace la situación más complicada porque da lugar a la existencia de todo un zoo de ondas magnéticas y magnetoacústicas cuyas propiedades de propagación son diferentes. Incluso, ante determinadas condiciones, ondas de un tipo se pueden convertir en otras. En general, se puede decir que la trayectoria que siguen las ondas en la atmósfera solar viene determinada por la topología del campo, actuando este como guía para su propagación. De esta manera, el campo permite transportar energía desde la fotosfera hasta la corona. El estudio del acoplamiento de la atmósfera solar por ondas ha recibido mucha atención recientemente por su complejidad, su atractivo teórico y numérico y por su dificultad de observación. Las ondas se suelen detectar fácilmente como fluctuaciones periódicas de la velocidad o, en algunos casos, de brillo. Sin embargo, las correspondientes fluctuaciones del campo magnético que deben llevar asociadas, necesarias para determinar de manera unívoca el tipo de onda, distan mucho de ser detectadas. Estas fluctuaciones son mucho más pequeñas y rápidas de lo que podemos medir en la actualidad y son necesarios los telescopios de nueva generación, con instrumentación avanzada y especialmente diseñada para este fin y poder observar las ondas simultáneamanente a diferentes alturas para detectar así su propagación.

Pero no es suficiente con medir y entender la propagación de las ondas. Para poder calentar el plasma, es necesario que las ondas sean capaces de liberar su energía en forma de calentamiento. El mecanismo más atractivo en la actualidad está basado en la disipación de las corrientes asociadas a las fluctuaciones espacio-temporales del campo magnético (dependientes del tipo de modo; de ahí la importancia de determinar sus propiedades). Para ello, la presencia de especies neutras parece fundamental por las colisiones generadas entre estas partículas y las cargas que transportan las corrientes eléctricas.

3.5. Fulguraciones solares y fenómenos eruptivos

Las fulguraciones solares se producen como consecuencia de la reconfiguración del campo magnético de la corona iniciada por una inestabilidad. Como resultado, la energía magnética almacenada previamente al desarrollo de la inestabilidad se libera en forma de energía térmica, de energía cinética de las partículas que se ven aceleradas y de radiación. En ocasiones, las fulguraciones más grandes vienen acompañadas por CME. Como la mayor parte de la energía radiada procede de la cromosfera, es necesario realizar un análisis energético detallado de esta capa (con las dificultades intrínsecas mencionadas anteriormente), así como medir la configuración magnética 3D antes, durante y después de la fulguración, algo para lo que existen muy pocos trabajos.

La configuración magnética coronal se obtiene en la actualidad a partir de extrapolaciones del campo magnético fotosférico usando condiciones de contorno que se denominan libres de fuerzas en las que se deja al campo expandirse libremente en el espacio. El campo magnético fotosférico está lejos de estas condiciones. El campo magnético cromosférico está más cercano a esta situación y su medida con los nuevos telescopios permitirá mejorar nuestra capacidad de descripción de sus valores coronales, identificar las condiciones de evolución e inestabilidad y aumentar las posibilidades de predicción de estos fenómenos. Este es un aspecto en el que, otra vez, las nuevas infraestructuras tendrán un papel fundamental.

3.6. La ionización parcial del plasma solar

La fotosfera y la cromosfera están solo ionizadas parcialmente. El grado de ionización (relación entre el número de partículas cargadas y el número total de partículas) en la fotosfera es menor que 10⁻³ y aumenta hasta alrededor de 0,5 en la cromosfera. Las repercusiones derivadas de esta situación todavía

no han sido tenidas en cuenta adecuadamente por la comunidad de física solar. Sólamente en el último decenio han empezado a desarrollarse las herramientas adecuadas (teóricas y numéricas) para entender su importancia. Gracias a los grandes avances recientes en el desarrollo en supercomputación ha sido posible simular los complejos efectos derivados de la ionización parcial y sus profundas consecuencias. Los trabajos españoles de, por ejemplo, Soler et al. (2010) y Khomenko et al. (2014) son representativos del estado actual del tema.

La gran mayoría de los estudios de la dinámica fotosférica, cromosférica y coronal usa la aproximación magnetohidrodinámica (MHD) como herramienta principal para describir los complejos procesos que ocurren en la atmósfera solar. Sin embargo, la MHD no tiene en cuenta mecanismos no ideales asociados a la interacción entre partículas neutras y cargadas en plasmas débilmente ionizados, de especial relevancia en la cromosfera sobre todo. Las partículas cargadas sienten la fuerza de Lorentz mientras que las partículas neutras no lo hacen. El acoplamiento entre ellas se produce necesariamente a través de colisiones con el resultado inmediato de la aparición de nuevos mecanismos de disipación, que reducen las corrientes y calientan el plasma. En estos últimos años, se han demostrado con experimentos numéricos que el alejamiento del plasma de las condiciones ideales de ionización



Figura 15. Imagen sintética de magnetoconvección obtenida con el código Mancha del IAC. Las dimensiones horizontales del dominio son de 23 x 23 Mm² con una resolución de 20 km.

total puede ser clave para resolver el problema del calentamiento cromosférico (véase, p. ej., Martínez-Sykora et al. 2012; Khomenko & Collados 2012; Martínez-Sykora et al. 2016).

Una alternativa adecuada a la MHD, pero compleja, es el tratamiento multifluido en el que cada especie del plasma es tratada de manera independiente y todas ellas se acoplan a través de colisiones. Este tratamiento multifluido es esencial en el estudio del plasma cromosférico porque los procesos relevantes para el transporte de energía y su conversión ocurren a escalas espaciales y temporales cercanas a la escalas colisionales entre iones y neutros (Ballester et al. 2018). Los movimientos de deriva relativa entre especies es una cosecuencia directa de esta ionización parcial y refleja que el acoplamiento entre las especies no es lo suficientemente fuerte como para dar lugar a un comportamiento global conjunto como en un fluido único.

Las observaciones de la ionización parcial van significativamente por detrás de los desarrollos teóricos, como consecuencia de las altas resoluciones espaciales y temporal requeridas. Se espera que los nuevos telescopios puedan avanzar considerablemente en esta dirección y encontrar pruebas firmes de fenómenos directamente atribuibles a la ionización parcial.

3.7. Simulaciones numéricas "realistas"

Las simulaciones numéricas representan una de las herramientas más valiosas con las que cuentan los físicos solares. Con ellas se resuelven las ecuaciones MHD ante determinadas condiciones de contorno y se pretende reproducir la fenomenología solar.

Las simulaciones se pueden clasificar arbitrariamente en dos tipos: las ideales y las realistas. Las simulaciones ideales pretenden aislar un determinado fenómeno para poder entenderlo con mayor detalle. En ellas se suelen incluir condiciones muy básicas como homogeneidad del plasma, estructuras magnéticas idealizadas (como tubos de flujo con simetría cilíndrica ideal, por ejemplo), arcos magnéticos rectos, etc. Cada caso particular permite unas simplificaciones adecuadas que facilitan el estudio adecuado. Este es el acercamiento que se ha seguido, por ejemplo, para el estudio de los modos característicos de oscilación de las estructuras magnéticas o para la propagación de ondas en diferentes topologías magnéticas. La transmisión, reflexión, refracción y disipación de ondas se han aprovechado en gran medida de este tipo de simulaciones. El tratamiento multifluido del plasma es otra rama que se beneficia de estas simulaciones ideales.

En el lado opuesto están las denominadas simulaciones realistas. En ellas se pretende incluir toda la complejidad del plasma solar, incluyendo el transporte radiativo. Por su propia naturaleza, solo se pueden llevar a cabo en grandes supercomputadores. Como resultado de ellas, se intenta describir fenómenos solares que se aproximen lo más posible a la realidad o identificar elementos que falten en la física que se introduce en las ecuaciones, en el caso de que la reproducción no se acerque a lo observado. Los experimentos numéricos de magnetoconvección representan quizás el mayor éxito de este tipo de simulaciones (véase, a modo de ejemplo, la figura 13). La convección se genera de manera autoconsistente una vez impuesta la condición de contorno adecuada en la parte inferior del dominio, en forma de flujo radiativo. La opacidad del material impide el transporte efectivo de la energía por radiación y se desarrollan de manera inmediata las celdas convectivas. El parecido con las mejores imágenes obtenidas de la granulación es fascinante.

La interacción con el campo magnético también contiene los ingredientes esenciales, al menos en la fotosfera y en las capas subfotosféricas donde la MHD es aplicable. Las simulaciones más avanzadas intentan reproducir manchas solares, fulguraciones y fenómenos cromosféricos. Los resultados son esperanzadores, pero todavía quedan detalles que se sintonizan "manualmente", indicando que hay algún ingrediente físico que no está tenido en cuenta de manera adecuada. Los efectos no ideales derivados de la ionización parcial son un ejemplo.

El uso conjunto de las simulaciones más avanzadas y de las mejores observaciones permitirá en el futuro no sólamente estudiar los observables que se pueden determinar directamente a través de la observación sino el resto de magnitudes físicas y su estratificación con la altura/profundidad.



Figura 16. Esquemas polares de la velocidad del viento solar derivados tras los dos primeros pasos de la sonda Ulysses por encima de los polos. El color viene determinado por la polaridad del campo magnético interplanetario. Figura obtenida de McComas et al. 2008.

3.8. Origen del viento solar

La corona solar se expande de manera continua hacia el espacio interplanetario y acoge un viento supersónico que interacciona con la Tierra y otros planetas. El viento solar tiene efectos notables en los planetas y sus entornos planetarios y es responsable de muchos fenómenos que ocurren en la atmósfera terrestre.

Existen dos componentes del viento solar, la rápida (~700 km/s) y la lenta (~400-500 km/s). El equilibrio entre ellas viene modulado por el ciclo solar de 11 años. Se sabe que el viento rápido tiene su origen en los polos solares, en lo que se denominan agujeros coronales, zonas en las que las líneas del campo magnético solar se abren hacia el espacio exterior. La componente lenta aparece concentrada cerca de la eclíptica en la mayor parte del ciclo, consistente con unas líneas de campo más cerradas y asociadas a la presencia de regiones activas, y tiene una influencia mayor en el entorno más inmediato a la Tierra. El mecanismo de escape del viento lento a través de estas líneas cerradas no está establecido y requiere una misión espacial como *Solar Orbiter* que se acerque al Sol a distancias mucho más pequeñas que 1 UA.

Como resultado de su origen diferente, las dos componentes del viento tienen distintas composiciones. El viento lleva consigo fluctuaciones turbulentas que pueden afectar de manera diferente a las dos componentes y ser responsables del diverso calentamiento y aceleración de las partículas. Poder llegar a entender la física que subyace y relacionar los procesos que se desarrollan en la atmósfera baja solar (fotosfera y cromosfera) con el calentamiento y la aceleración del viento solar es uno de los retos más grandes para la Física Solar del siglo XXI.

3.9. Fenómenos transitorios solares y heliosfera

Los fenómenos transitorios a mayor escala son las emisiones de masa coronal en las que inmensas cantidades de material (con su campo magnético asociado) son eyectadas desde el Sol a velocidades de hasta 3000 km/s. En ocasiones, las CME están asociadas a fulguraciones y a la eyección de filamentos visibles en imágenes cromosféricas. Las CME tienen también interés en un entorno astrofísico, más allá de lo que es la física solar, porque representan el procedimento físico por el que las estrellas pierden flujo magnético y helicidad los cuales se acumulan como resultado del continuo funcionamiento de la dinamo estelar. Las CME generan choques en el medio interplanetario, pero las ubicaciones y los mecanismos de formación de estos choques son desconocidos ya que ocurren en la parte interna del sistema solar. Las CME son la causa principal de las tormentas geomagnéticas y su estudio es de importancia primordial para entender la meteorología espacial y su impacto en la Tierra.

3.10. Producción de partículas energéticas en las erupciones solares

Al igual que muchos sistemas astrofísicos, el Sol es un acelerador de partículas muy eficiente. Durante los fenómenos eruptivos, la energía magnética liberada se reconvierte parcialmente en energía cinética para generar partículas solares energéticas (SEP, por su denominación en inglés). Los choques producidos en las CME pueden producir partículas relativistas en escalas temporales de minutos y muchas CME convierten ~10% de su energía cinética en energía de las partículas. Otros mecanismos producen también SEP en arcos magnéticos sin necesidad de tener choques. Los múltiples procesos que actúan en fenómenos que involucran SEP siguen sin estar bien explicados o ser distinguibles a 1 UA. En particular, las partículas aceleradas en la corona y en la heliosfera interna se dispersan por las inhomogeneidades del campo magnético interplanetario antes de su llegada a la Tierra y se pierde gran parte de la información sobre los procesos que las aceleraron. La distribución de partículas generadas en los choques de las CME es otro aspecto que merece exploración futura para completar el escenarios de la aceleración de partículas.

3.11. La dinamo solar y la conexión Sol-heliosfera

El campo magnético del Sol conecta el interior de nuestra estrella con el medio interplanetario y su evolución está dominada por el ciclo de activiad de 11 años que modula la forma de la heliosfera y afecta todo el espacio del sistema solar. El campo magnético es generado en el interior del sol por una dinamo que es resultado de complejos movimientos de materia que transportan, procesan y amplifican el campo. A pesar de todos los avances realizados por misiones espaciales como Ulysses, SoHO e Hinode, así como los resultados de modelos teóricos y simulaciones numéricas del campo global del Sol, todavía permanecen sin contestar preguntas fundamentales sobre la operación y naturaleza cíclica de la actividad magnética solar. El estudio detallado del transporte de flujo hacia latitudes altas es de vital importancia para poder responder a estas preguntas, pero nuestro conocimiento de las propiedades magnéticas del plasma en latitudes altas es muy limitado, porque las observaciones se hacen desde el plano de la eclíptica. Una misión como Solar Orbiter, con su alejamiento de este plano, proporcionará datos muy valiosos en esta dirección.

4. CONCLUSIONES

Los físicos solares nacionales hemos realizado un largo recorrido desde nuestros orígenes como principiantes hace cincuenta años. En la actualidad participamos en los proyectos más relevantes y lideramos algunos de los desarrollos instrumentales más ambiciosos (como es el caso de algunos instrumentos de las misiones *Sunrise* y *Solar Orbiter* y el del desarrollo de EST) y los aspectos teóricos (transporte radiativo, física del plasma y códigos numéricos).

En este artículo hemos pretendido dar modestamente nuestra visión de dónde está la física solar en la actualidad y hacia dónde se dirige. El tema es demasiado amplio y necesariamente hemos tenido que ser concisos (a pesar de la longitud del artículo) para dar cabida al mayor número de temas posible.

Hemos resumido los principales logros de los físicos solares nacionales en cincuenta años. Hemos revisado los principales telescopios, terrenos y espaciales, actualmente en operación, juntamente con su instrumentación. Hemos descrito los principales proyectos que están por venir. Y, finalmente, hemos resumido algunos aspectos científicos en los que creemos que la física solar estará centrada en las próximos año o decenios. Seguramente nos equivocamos mucho en esto último. La investigación lleva al progreso y es difícil prever por dónde irán los próximos descubrimientos una vez se empiecen a tener nuevos y mejores datos. Eso es lo que hace interesante la investigación.

NOTAS

- 1 Obviamente, nuestros apuntes históricos no pretenden ser un trabajo con rigor, sino que mencionan algunos hitos que ilustran la evolución. "Son todos los que están, pero no están todos los que son".
- 2 El National Solar Observatory americano está dirigido por Valentín Martínez Pillet.
- 3 El director científico de la misión SoHO de la ESA fue Vicente Domingo Codoñer, actualmente profesor emérito de la Universitat de València.
- 4 Los LCVR vuelan en una misión espacial por primera vez en Solar Orbiter. La tecnología cualificada para ello es del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Los LCVR de METIS fueron, de hecho, adquiridos al INTA.

REFERENCIAS

- Asensio Ramos, A., Trujillo Bueno, J., and Landi Degl'Innocenti, E. (2008), "Advanced forward modeling and inversion of stokes profiles resulting from the joint action of the Hanle and Zeeman effects", ApJ 683, 542.
- Ballester, J.L. (1983), "Kinematics of solar prominences", Sol. Phys. 87, 261.
- Ballester, J.L., Alexeev, I., Collados, M., Downes, T., Pfaff, R.F., Gilbert, H., Khodachenko, M., Khomenko, E., Shaikhislamov, I.F., Soler, R., Vázquez-Semadeni, E., and Zaqarashvili, T. (2018), "Partially Ionized Plasmas in Astrophysics", SSRv 214, 58.
- Ballester, J.L. and Priest, E. (1987), "A two-dimensional model for a solar prominence", Sol. Phys. 109, 335.

- Ballesteros, E., Collados, M., Bonet, J. A., Lorenzo, F., Viera, T., Reyes, M., and Rodríguez Hidalgo, I. (1996), "Two-dimensional, high spatial resolution, solar spectroscopy using a correlation tracker. I. Correlation tracker description", A&AS 115, 353.
- Barthol, P. et al. (2011), "The Sunrise mission", Sol. Phys. 268, 1.
- Bellot Rubio, L.R., Balthasar, H., and Collados, M. (2004), "Two magnetic components in sunspot penumbrae", A&A 427, 319.
- Berger, T.E., Rouppe van der Voort, L.H.M., Löfdahl, M.G., Carlsson, M., Fossum, A., Hansteen, V. H., Marthinussen, E., Title, A., and Scharmer, G. (2004), "Solar magnetic elements at 0.1 arcsec resolution. General appearance and magnetic structure", A&A 428, 613.
- Berkefeld, Th., Schmidt, D., Soltau, D., von der Lühe, O., Heidecke, F.: 2012, "The GREGOR adaptive optics system", AN 333, 863
- Borrero, J. M., Franz, M., Schlichenmaier, R., Collados, M., and Asensio Ramos, A. (2017), "Penumbral thermal structure below the visible Surface", A&A 601, 8.
- Casanovas, J. (1968), "Observational decay curves for calcium chromospheric plages", Mem. Soc. Astron. It. 39, 703.
- Casini, R., López Ariste, A., Tomczyk, S., and Lites, B. W. (2003), "Magnetic Maps of Prominences from Full Stokes Analysis of the He I D3 Line", ApJ 598, 67.
- Centeno, R., Socas-Navarro, H., Lites, B.; Kubo, M., Frank, Z., Shine, R., Tarbell, T., Title, A., Ichimoto, K., Tsuneta, S., Katsukawa, Y., Suematsu, Y., Shimizu, T., and Nagata, S. (2007), "Emergence of Small-Scale Magnetic Loops in the Quiet-Sun Internetwork", ApJ 666, 137.
- Claverie, A.; Isaak, G. R., McLeod, C. P., van der Raay, H. B., and Roca Cortés, T. (1980), "Structure in the 5 minute oscillations of integral sunlight", A&A 91, L9.

- Collados, M., Bettonvil, F., Cavaller, L., Ermolli, I., Gelly, B., Pérez, A., Socas-Navarro, H., Soltau, D., Volkmer, R., EST Team (2010), "European Solar Telescope: Progress status", AN 331, 615.
- Collados, M., Lagg, A., Díaz García, J. J., Hernández Suárez, E., López López, R., Páez Mañá, E., and Solanki, S. K. (2007), "Tenerife Infrared Polarimeter II", in The Physics of Chromospheric Plasmas, ASP Conference Series, Vol. 368, 611.
- Collados, M., López, R., Páez, E., et al.: 2012, "GRIS: The GREGOR infrared spectrograph", AN 333, 872.
- Collados, M., Rodríguez Hidalgo, I., Ballesteros, E., Ruiz Cobo, B., Sánchez Almeida, J.; del Toro Iniesta, J. C. (1996), "Two-dimensional, high spatial resolution, solar spectroscopy using a Correlation Tracker. II. Maps of spectral quantities", A&AS 115, 367.
- De Pontieu, B., Hansteen, V. H., Rouppe van der Voort, L., van Noort, M., and Carlsson, M. (2007a), "High-Resolution Observations and Modeling of Dynamic Fibrils", ApJ, 655, 624.
- De Pontieu, B., McIntosh, S., Hansteen, V. H., et al. (2007b), "A Tale of Two Spicules: The Impact of Spicules on the Magnetic Chromosphere", PASJ, 59, S655.
- Del Toro Iniesta, J.C. (2003), "Introduction to spectropolarimetry", Cambridge University Press, Cambridge.
- Domingo, V. et al. (1995), "The SOHO mission: an overview", Sol. Phys. 162, 1.
- Felipe, T., Collados, M., Khomenko, E., Rajaguru, S. P., Franz, M., Kuckein, C., and Asensio Ramos, A. (2017), "Signatures of the impact of flare-ejected plasma on the photosphere of a sunspot light bridge", A&A 608, 97.
- Ferriz-Mas, A. And Moreno-Insertis, F. (1992), "Shock wave propagation in a magnetic flux tube", Phys. Fl. 4, 2700.

- Frazier, E.N. and Stenflo, J.O. (1972), "On the small-scale structure of solar magnetic fields", Sol. Phys. 27, 330.
- Goode, P.R., Denker, C.J., Didkovsky, L.I., Kuhn, J. R.; Wang, H. (2003), "1.6 m solar telescope in Big Bear — The NST", Journal of the Korean Astronomical Society 36, 125.
- Goosens, M., Terradas, J., Andries, J., and Ballester, J.L. (2009), "On the nature of kink MHD waves in magnetic flux tubes", A&A 503, 213.
- Harvey, J. (1971), "Solar magnetic fields Small scale", PASP 83, 539.
- Hathaway, D., SDO SDT Panel (2001), "Solar Dynamics Observatory report of the science definition team. Technical report". http://www.nswp.gov/sdo/ sdosdtreport.pdf.
- Hofmann, A., Arlt, K., Balthasar, H., et al.: 2012, "The GREGOR polarimetric calibration unit", AN 333, 854.
- Howard, R. and Stenflo, J.O. (1972), "On the filamentary nature of solar magnetic fields", Sol. Phys. 22, 402.
- Katsukawa, Y., Berger, T. E., Ichimoto, K., Lites, B. W., Nagata, S., Shimizu, T., Shine, R. A., Suematsu, Y., Tarbell, T. D., Title, A. M., andTsuneta, S. (2007), "Small-Scale Jetlike Features in Penumbral Chromospheres", Science 318, 1594.
- Khomenko, E. and Collados, M. (2006), "Numerical modeling of magnetohydrodynamic wave propagation and refraction in sunspots", ApJ 653, 739.
- Khomenko, E. and Collados, M. (2009), "Sunspot seismic halos generated by fast MHD wave refraction", A&A 506, L5.
- Khomenko E. and Collados, M. (2012), "Heating of the Magnetized Solar Chromosphere by Partial Ionization Effects", ApJ 747, 87.
- Khomenko, E., Collados, M., Díaz, A., and Vitas, N. (2014), "Fluid description of multi-component solar partially ionized plasma", Physics of Plasmas, 21, 092

- Kosugi, T. et al. (2007), "The Hinode (Solar-B) mission: an overview", Sol. Phys. 243, 3.
- Lagg, A. et al. (2010), "Fully resolved quiet-Sun magnetic flux tube observed with the SUNRISE/ IMAX instrument", ApJ 723, L164.
- Lites, B. W., Elmore, D. F., & Streander, K. V. (2001), "The Solar-B spectro-polarimeter", in ASP Conf. Ser. 236, Advanced Solar Polarimetry—Theory, Observation, and Instrumentation, ed. M. Sigwarth (San Francisco: ASP), 33.
- Lites, B. W., Kubo, M., Socas-Navarro, H., Berger, T., Frank, Z., Shine, R., Tarbell, T., Title, A., Ichimoto, K., Katsukawa, Y., Tsuneta, S., Suematsu, Y., Shimizu, T., Nagata, S. (2008), "The horizontal magnetic flux of the quiet-Sun internetwork as observed with the Hinode spectro-polarimeter", ApJ 672, 1237.
- Löfdahl, M.G., Hillberg, T., de la Cruz Rodríguez, J., Vissers, G., Scharmer, G.B., Hagfors Haugan, S.V., Fredvik, T. (2018), "A data-processing and metadata-generating pipeline for CHROMIS and CRISP", submitted to A&A, arXiv:1804.03030.
- Martínez González, M.J. and Bellot Rubio, L.R. (2009), "Emergence of Small-scale Magnetic Loops Through the Quiet Solar Atmosphere", ApJ 700, 1391.
- Martínez González, M. J., Collados, M., Ruiz Cobo, B., and Beck, C. (2008), "Internetwork magnetic field distribution from simultaneous 1.56 μ m and 630 nm observations", A&A 477, 953.
- Martínez González, M.J., Manso Sainz, R., Asensio Ramos, A., Beck, C., de la Cruz Rodríguez, J., and Díaz, A.J. (2015), "Spectro-Polarimetric Imaging Reveals Helical Magnetic Fields in Solar Prominence Feet", ApJ 802, 3.
- Martínez Pillet, V., Collados, M., Sánchez Almeida, J., González, V., Cruz-López, A., Manescau, A., Joven, E., Páez, E., Díaz, J., Feeney, O., Sánchez V., Scharmer, G., and Soltau, D. (1999), "LPSP & TIP: full Stokes polarimeters for the Canary Islands observatories", in High Resolution Solar Physics:

Theory, Observations, and Techniques, ASP Conference Series 183. Eds. T. R. Rimmele, K. S. Balasubramaniam, and R. R. Radick, p. 264.

- Martínez Pillet, V. et al. (2011), "The Imaging Magnetograph eXperiment (IMaX) for the Sunrise balloon-borne solar observatory", Sol. Phys. 268, 57.
- Martínez-Sykora, J., De Pontieu, B., Carlsson, M., and Hansteen, V. (2016), "On the Misalignment between Chromospheric Features and the Magnetic Field on the Sun", ApJ 831, 1.
- Martínez-Sykora, J., De Pontieu, B., and Hansteen, V. (2012), "Two-dimensional Radiative Magnetohydrodynamic Simulations of the Importance of Partial Ionization in the Chromosphere", ApJ 753, 161.
- McComas, D. J., Ebert, R. W., Elliott, H. A., Goldstein, B. E., Gosling, J. T., Schwadron, N. A., and Skoug, R. M. (2008). "Weaker solar wind from the polar coronal holes and the whole Sun", Geophys. Res. Lett. 35, L18103.
- Moreno-Insertis, F. (1983), "Rise times of horizontal magnetic flux tubes in the convection zone of the sun", A&A 122, 241.
- Oliver, R., Ballester, J. L., Hood, A. W., and Priest, E. R. (1992), "Magnetohydrodynamic waves in a solar prominence", ApJ 400, 369.
- Orozco Suárez, D., Asensio Ramos, A., and Trujillo Bueno, J. (2014), "The magnetic field configuration of a solar prominence inferred from spectropolarimetric observations in the He I 10 830 Å triplet", A&A 566, 46.
- Orozco Suárez, D., Bellot Rubio, L.R., Del Toro Iniesta, J.C., Tsuneta, S., Lites, B., Ichimoto, K., Katsukawa, Y., Nagata, S., Shimizu, T., Shine, R.A., Suematsu, Y., Tarbell, T.D., and Title, A.M. (2007), "Quiet-Sun internetwork magnetic fields from the inversion of Hinode measurements", ApJ 670, L61.
- Ortiz, A., Bellot Rubio, L. R., and Rouppe van der Voort, L. (2010), "Downflows in Sunspot Umbral Dots", ApJ 713, 128.

- Parker, E.N. (1978), "Hydraulic concentration of magnetic fields in the solar photosphere. VI - Adiabatic cooling and concentration in downdrafts", ApJ 221, 368.
- Pérez Garde, M., Vázquez, M., Schwan, and H., Woehl, H. (1981), "Large-scale solar motions as determined by Doppler shift measurements using a linear photodiode array", A&A 91, 67.
- Puschmann, K.G., Denker, C., Kneer, F., et al. (2012), "The GREGOR Fabry-Pérot interferometer", AN 333, 880
- Requerey, I.S., Del Toro Iniesta, J.C., Bellot Rubio, L.R., Martínez Pillet, V., Solanki, S.K., Schmidt, W. (2015), "Dynamics of multi-cored magnetic structures in the quiet Sun", ApJ 810, 79.
- Requerey, I.S., Del Toro Iniesta, J.C., Bellot Rubio, L.R., Martínez Pillet, V., Solanki, S.K., Schmidt, W. (2017), "Convectively driven sinks and magnetic fields in the quiet-Sun", ApJS 229, 14.
- Rodríguez-Pacheco, J., Ho, G., Boettcher, S., Martin, C., Sánchez Prieto, S., Kulkarni, S., Prieto, M., Panitzsch, L., Gómez-Herrero, R., Mason, G.M., and Wimmer-Schweingruber, R. (2016), "EPD: the energetic particle instrumentation aboard Solar Orbiter", in 41st COSPAR Scientific Assembly, abstracts from the meeting that was to be held 30 July 7 August at the Istanbul Congress Center (ICC), Turkey.
- Ruiz Cobo, B. and Del Toro Iniesta, J.C. (1992), "Inversion of Stokes profiles", ApJ 398, 375.
- Sánchez Almeida, J., Collados, M., Del Toro Iniesta, J. C., and Solanki, S. K. (1988), "Magnetic field strength in solar flux tubes - A model atmosphere independent determination", A&A 196, 266.
- Scharmer, G.B., Bjelksjo, K., Korhonen, T.K., Lindberg, B., and Petterson, B. (2003), "The 1-meter Swedish solar telescope," Proc. SPIE 4853, Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics, doi: 10.1117/12.460377.

- Scharmer, G.B., Dettori, P., Löfdahl, M. G., and Shand, M. (2002), "Adaptive optics and correlation tracker systems for the new Swedish solar telescope," in Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics, S. Keil and S. Avakyan, eds., Proc. SPIE 4853-52.
- Scharmer, G.B., Narayan, G., Hillberg, T., de la Cruz Rodríguez, J., Löfdahl, M.G., Kiselman, D., Sütterlin, P., van Noort, M., and Lagg, A. (2008), "CRISP spectropolarimetric imaging of penumbral fine structure", ApJ 689, 69.
- Scherrer, P.H. et al. (1995), "The solar oscillations investigation Michelson Doppler Imager", Sol. Phys. 162, 129.
- Scherrer, P. H., Schou, J., Bush, R. I., Kosovichev, A. G., Bogart, R. S., Hoeksema, J. T., Liu, Y., Duvall, T. L., Zhao, J., Title, A. M., Schrijver, C. J., Tarbell, T. D., Tomczyk, S. (2012), "The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO)", Sol. Phys. 275, 207.
- Schmidt, D., Gorceix, N., Goode, P.R., Marino, J., Rimmele, T., Berkefeld, T., Wöger, F. Zhang, X., Rigaut, F., and von der Lühe, O. (2017), "Clear widens the field for observations of the Sun with multi-conjugate adaptive optics", A&A 597, L8.
- Schmidt, W., von der Lühe, O., Volkmer, R., Denker, C., Solanki, S. K., Balthasar, H., Bello Gonzalez, N., Berkefeld, Th., Collados, M.; Fischer, A., et al. (2012), "The 1.5 meter solar telescope GREGOR", AN 333, 796.
- Schou, J., Scherrer, P. H., Bush, R. I., Wachter, R., Couvidat, S., Rabello-Soares, M. C., Bogart, R. S., Hoeksema, J. T., Liu, Y., Duvall, T. L., Akin, D. J., Allard, B. A., Miles, J. W., Rairden, R., Shine, R. A., Tarbell, T. D., Title, A. M., Wolfson, C. J., Elmore, D. F., Norton, A. A., Tomczyk, S. (2012), "Design and ground calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) instrument on the Solar Dynamics Observatory", Sol. Phys. 275, 229.
- Schüssler, M. and Vögler, A. (2006), "Magnetoconvection in a Sunspot Umbra", ApJ 641, 73.

- Sheeley, N.R., Jr. (1966), "Measurements of solar magnetic fields", ApJ 144, 723.
- Sheeley, N.R., Jr. (1967), "Observations of smallscale solar magnetic fields", Sol. Phys. 1, 171.
- Socas-Navarro, H., Trujillo Bueno, J., and Ruiz Cobo, B. (2000), "Non-LTE Inversion of Stokes Profiles Induced by the Zeeman Effect", ApJ 530, 977.
- Solanki, S.K. et al. (2010), "SUNRISE: instrument, mission, data, and first results", ApJ 723, L127.
- Solanki, S.K., Del Toro Iniesta, J.C., Woch, J., Gandorfer, A., Hirzberger, J., Schmidt, W., Appourchaux, T., Álvarez-Herrero, A., and the SO/PHI team (2015), "The Polarimetric and Helioseismic Imager for Solar Orbiter: SO/PHI", in IAU Symp. 305, 108.
- Soler, R., Díaz, A. J., Ballester, J. L., and Goossens, M. 2012, "Kelvin-Helmholtz Instability in Partially lonized Compressible Plasmas", ApJ, 749, 163
- Spruit, H. (1979), " Convective collapse of flux tubes", Sol. Phys. 61, 363.
- Spruit, H. C. and Scharmer, G. B. (2006), "Fine structure, magnetic field and heating of sunspot penumbrae", A&A 447, 343.
- Stenflo, J.O. (1973), "Magnetic-field structure of the photospheric network", Sol. Phys. 32, 41.
- Title, A. M. and Schrijver, C. J. (1998), "The magnetiet carpet", in ASP Conf. Ser. 154, The Tenth Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun, Edited by R. A. Donahue and J. A. Bookbinder, p.345.
- Trujillo Bueno, J. and Landi Degl'Innocenti, E. (1997), "Linear polarization due to lower level depopulation pumping in stellar atmospheres", ApJ 482, L183.
- Trujillo Bueno, J., Shchukina, N., and Asensio Ramos, A. (2004), "A substantial amount of hidden magnetic energy in the quiet Sun", Nature 430, 326.

- Ulmschneider, P. (1989), "The chromospheric emission from acoustically heated stellar atmospheres", A&A 222, 171.
- Vázquez, M. (1973), "A morphological study of the light-bridges in sunspots", Sol. Phys. 31, 377.
- von der Lühe, O., Volkmer, R., Kentischer, T.J., Geißler, R. (2012), "The GREGOR broad-band imager", AN 333, 894.

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.

RAFAEL REBOLO, PREMIO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS FÍSICAS, CIENCIAS DE LOS MATERIALES Y DE LA TIERRA 2018

Nuestro colega y director del Instituto de Astrofísica de Canarias **Rafael Rebolo** ha sido galardonado con el Premio Nacional de Investigación en Ciencias Físicas, Ciencias de los Materiales y de la Tierra 2018, concedido por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Los Premios Nacionales de Investigación, que no se entregaban desde 2014, suponen el reconocimiento más importante de España en el ámbito de la investigación científica. iFelicidades Rafael!

ENRIC MARCO, PRESIDENTE DE CEL FOSC

Nuestro colega de la Universidad de València **Enric Marco** ha sido nombrado presidente de la asociación Cel Fosc (Cielo Oscuro) que lucha activamente por la conservación de los cielos oscuros en nuestro país y realiza numerosas actividades para concienciar a ciudadanos y autoridades políticas de la necesidad de reducir la contaminación lumínica. ¡Mucho ánimo, Enric, que no es tarea fácil la vuestra!

AMELIA ORTIZ GIL, PREMIO 9 D'OCTUBRE

El pasado 9 de Octubre el ayuntamiento de Alberic (Valencia) otorgó el Premio 9 d'Octubre de Ciencia e Investigación de 2018 a **Amelia Ortiz Gil** (Universidad de València) por su brillante trayectoria profesional. iFelicidades!

MIRJANA POVIC, PREMIO NATURE RESEARCH AWARD

La investigadora **Mirjana Povic**, miembro de la Sociedad Española de Astronomía (SEA) e investigadora del Instituto Etíope de Ciencia y Tecnología Espaciales, ha sido galardonada con el Nature Research Award en la categoría de ciencia inspiradora. Estos premios buscan apoyar la igualdad de género y mostrar el trabajo de las mujeres en ciencia. Mirjana trabaja en el desarrollo de la ciencia y la educación en África, con especial atención a las mujeres. iEnhorabuena por este merecidísimo reconocimiento!

JOSÉ CERNICHARO, MEDALLA DE LA REAL SOCIEDAD Española de física

José Cernicharo ha sido galardonado con la Medalla de la Real Sociedad Española de Física "por ser uno de los pioneros mundiales de la astrofísica molecular con un marcado liderazgo en distintas instituciones y con un alto impacto y reconocimiento". iEnhorabuena José!

CAMBIO DE RESPONSABLE DEL BOLETÍN DE LA SEA

Tras varios años de dedicación, despedimos a Antxón Alberdi como responsable de la publicación de este boletín de la SEA, agradeciéndole todo el apoyo que nos ha brindado a los que semestre tras semestre trabajamos en él. Y recibimos al nuevo responsable **Manuel Collados**, que se estrena con un artículo en este mismo número del Boletín.

LIBROS

El ojo desnudo

Si no lo ven, ¿cómo saben que está ahí? El fascinante viaje de la ciencia más allá de lo aparente

Antonio Martínez Ron

CRÍTICA

atrevieron a proponer hipótesis que luego resultaron erróneas, pero que abrieron el camino a otros que encontraron finalmente la explicación correcta. La ciencia no es solo un rio caudaloso sino una red de riachuelos que muchas veces no llegan al mar.

Y de todas las vidas contadas destaca la historia de John Dalton, el padre de la teoría atómica y el primer científico en describir la ceguera al color, también llamado daltonismo. Acompañar a Dalton haciendo experimentos con flores y descubrir con él que los geranios tienen flores rosa aunque él la veía azules. Seguirlo en su búsqueda de la verdad de sus ojos, que dejó en herencia a su médico personal para que descubriera la realidad de su diversidad visual y así se confirmara su hipótesis. Esta es, sin duda, la mejor parte del libro y su hilo conductor.

Evidentemente la luz que ven nuestros ojos es solo parte del espectro electromagnético. Martínez Ron explora las luces invisibles que son parte de éste aunque no las veamos. Lo hace junto con sus descubridores pero también propone experimentos caseros para hacerlas "visibles", a veces con la ayuda de nuestro gato, o de un gin-tonic en una discoteca. Radiaciones que abrieron un nuevo mundo inexplorado, el del átomo, las partículas elementales y la física cuántica a principios del siglo XX, de la mano de Planck, Bohr, Einstein, Schrödinger, de Broglie y de tantos otros. Logros asombrosos del conocimiento humano que continúan como el hallazgo del esquivo bosón de Higgs o la detección de las ondas gravitatorias.

El recomendable libro de Martínez Ron que derrocha pasión por la ciencia es una verdadera enciclopedia de como el ingenio humano ha sido capaz de percibir el mundo natural más allá de lo aparente. No solo ahora lo entendemos sino que, como dice él mismo al final del libro, estamos más cerca del día en que seremos capaces de construir nuestros propios ojos.

> Enric Marco Dept. Astronomia i Astrofísica Universitat de València

EL OJO DESNUDO

Antonio Martínez Ron ISBN: 978-84-9892-981-2 Editorial Crítica

La niña no debería tener más de 8 años. Le costaba llegar a mirar por el ocular del telescopio. La Luna, en un cuarto creciente avanzado, brillaba en el cielo de verano. La niña dio un salto y dejó escapar un grito de admiración.

-¿Es la Luna? -Me preguntó.

-Y los círculos que se ven, ¿qué son?

–Son los cráteres y fueron causados por el choque de inmensas rocas provenientes del espacio.

No se lo acababa de creer, como si hubiera descubierto todo un nuevo mundo por conocer.

Esta historia real nos ha pasado numerosas veces a todos los que nos dedicamos de vez en cuando a las observaciones astronómicas públicas.

Acostumbrados en nuestra vida diaria a conocer el mundo que nos rodea con la información que llega a nuestros ojos, no deja de sorprendernos que existan otros mundos invisibles que permiten ampliar nuestro conocimiento de la realidad. Sin la invención del telescopio en el siglo XVII no hubiéramos llegado a saber nada sobre el origen y estructura del universo o a comprender que somos polvo de estrellas. Así mismo, sin la invención del microscopio poco podríamos conocer sobre las enfermedades o el mismo origen de la vida. Estos complementos a la visión humana han sido el resultado de la investigación de la naturaleza de la luz, que a su vez ha venido de la mano de preguntas que nos hemos hecho sobre el funcionamiento del ojo. Visión y luz son un dúo inseparable cuyo estudio ha sido simultáneo durante siglos. Para explicar la visión humana ha sido necesario conocer el ojo como instrumento óptico, así como comprender como es captada la luz por los fotoreceptores de la retina y como la imagen final es procesada en la corteza visual del cerebro. Y como seres visuales que somos, la luz captada por nuestros ojos es la fuente primaria de información de nuestro entorno.

De hecho, el ojo desnudo fue el único instrumento de información antes de la revolución científica. "El ojo desnudo" es precisamente el título del libro del periodista científico Antonio Martínez Ron, en el que se adentra en estas cuestiones: por qué vemos como vemos y cómo hemos alcanzado a comprender fenómenos que van más allá de lo que nuestros sentidos nos permiten detectar.

Este libro narra la historia de la aventura humana por la cual hemos llegado a comprender el proceso de la visión y cómo ello nos ha llevado a explorar mundos previamente invisibles a través del conocimiento que hemos adquirido de la naturaleza de la luz. También se relatan las fascinantes vidas de los científicos que participaron en esta aventura, que sufrieron muchas veces la incomprensión de sus semejantes, que se

Fenómenos eruptivos en la atmósfera solar: modelado radiativo-magnetohidrodinámico y desarrollo de código

Autor: Daniel Nóbrega Siverio (dnobres@gmail.com) Tesis doctoral dirigida por: Fernando Moreno Insertis y Juan Martínez Sykora Centro: Universidad de La Laguna / Instituto de Astrofísica de Canarias Fecha de lectura: 6 de Julio de 2018

En la atmósfera solar tienen lugar continuamente una extraordinaria variedad de fenómenos eruptivos que abarcan un amplio rango de escalas espaciales y temporales. De especial interés son aquellos relacionados con reconexión magnética entre sistemas que interactúan en la atmósfera, sobre todo cuando es resultado de emergencia de flujo magnético procedente del interior solar. Dichos fenómenos causan grandes perturbaciones en la atmósfera solar, liberan energía magnética que se transforma en energía cinética e interna del plasma y radiación, expulsan masa de forma impulsiva, y provocan la reconfiguración del campo magnético cromosférico y coronal. Entre los fenómenos eruptivos, hay uno cuya comprensión ha progresado lentamente desde que se les conoció observacionalmente hace muchas décadas: los *surges*.

Los surges son eyecciones frías, densas y no colimadas observadas típicamente en líneas cromosféricas, como $H\alpha$ 6563 Å, con velocidades desde unas pocas hasta varias decenas de kms⁻¹ y longitudes de 10-50 Mm. Aparecen frecuentemente en la atmósfera relacionados con otros eventos de naturaleza efímera como estallidos UV o jets coronales de EUV/Rayos-X. Los experimentos numéricos idealizados del pasado explican los surges como un subproducto de reconexión magnética que tiene lugar entre los sistemas emergentes y preexistentes, y que, con el tiempo, arrastra plasma cromosférico a alturas superiores en la atmósfera. A pesar de su interés, estos experimentos carecen de algunos mecanismos físicos fundamentales a la hora de tratar con los surges lo que supone que solamente puedan considerarse como primeros pasos en su investigación.

Esta tesis abarca el fenómeno surges desde cuatro puntos de vista: (1) desde su enfoque básico, que es teórico, modela la formación y evolución de los surges usando un código radiativo-magnetohidrodinámico (R-MHD) que incluye un tratamiento realista de las propiedades del plasma y del transporte radiativo; (2) desde una perspectiva observacional, analiza observaciones coordinadas de alta resolución de la cromosfera y región de transición (RT), explora la respuesta de las líneas de RT a la eyección de un *surge*, y estudia la relación estrecha entre *surges* y otros fenómenos como estallidos UV; (3) desde una perspectiva de modelado directo, crea observaciones sintéticas que nos permiten entender algunas de las peculiares características vistas en las observaciones y proporcionarles un fundamento teórico; y (4) desde un punto de vista de programación científica, desarrolla un módulo de Fortran que mejora la eficiencia computacional del término de difusión ambipolar, abriendo, de esta manera, la posibilidad de incluir efectos de ionización parcial en la electrodinámica de nuestros estudios por medio de la ley generalizada de Ohm.

El primer objetivo se logra gracias a las posibilidades ofrecidas por el código Bifrost. Mediante experimentos R- MHD 2.5D de emergencia de flujo magnético desde las capas subyacentes a la superficie solar hasta la corona, hemos encontrado que el surge se forma a pesar de la interacción previa del campo emergente con las celdas granulares en y por debajo de la superficie. El surge se separa de la región emergida como consecuencia de choques fuertes causados por el impacto de plasmoides eyectados a lo largo de la capa de corriente en el sitio de reconexión. Durante su ascenso, los elementos de plasma del surge experimentan aceleraciones que superan por mucho la gravedad solar, mientras que en la fase central y de descenso sufren caída libre. Usando trazado Lagrangiano detallado, distinguimos diferentes poblaciones de patrones evolutivos dentro del surge, algunas de ellas directamente relacionadas con procesos de calentamiento/enfriamiento incluidos como parte del código Bifrost. De hecho, hemos encontrado que una fracción no despreciable del surge no puede ser reproducida en experimentos previos y más idealizados debido a la falta de un tratamiento adecuado para la termodinámica y fuentes de entropía.

Hemos conseguido el segundo objetivo por medio de observaciones de un *surge* H α simultáneo a un estallido UV obtenidos con el *Interface Region Imaging Spectrograph* (IRIS) y el *Swedish 1-m Solar Telescope* (SST), respectivamente. Aunque tradicionalmente relacionados con líneas cromosféricas, hemos encontrado que los *surges* pueden exhibir emisión UV realzada en líneas de Si IV con perfiles que son más brillantes y anchos que en una RT promedio. Además, proporcionamos evidencia observacional que respalda el origen común y la relación entre *surges* y estallidos UV.

El tercer objetivo se consigue por medio de modelado directo de experimentos numéricos que incluyen la ionización fuera del equilibrio de elementos clave en la RT como el silicio y el oxígeno. Los resultados muestran que la RT que envuelve al *surge* se ve fuertemente afectada por efectos de no-equilibrio, aumentando notablemente el número de emisores de las principales líneas de Si IV y O IV. La desviación del equilibrio estadístico se debe a los tiempos cortos de las pérdidas ópticamente delgadas y de la conducción térmica durante la evolución del *surge*. Además, hemos concluido que los efectos de línea de visión son importantes para entender los abrillantamientos intermitentes en Si IV y O IV dentro de los *surges*. Finalmente, hemos logrado el último propósito de esta tesis a través del desarrollo de un nuevo módulo en el código Bifrost que implementa el método *Super Time-Stepping* (STS) para acelerar los cálculos con difusión ambipolar. Mediante un análisis en detalle del método, encontramos la combinación óptima de parámetros que garantiza estabilidad y eficiencia. Como primera aproximación al trabajo a realizar en la etapa post doctoral, en el último capítulo empezamos a explorar los efectos de difusión ambipolar en el proceso de emergencia de flujo y en el propio *surge*.

Tesis disponible en https://b2drop.eudat.eu/s/XxSo9rOwzFciZjc



Mapa de densidad mostrando el surge con las cuatro poblaciones que lo componen mediante dominios de diferentes colores. Superpuestos, se representan dos contornos de temperatura: uno a 1.2 MK (rosa) y otro a 3x10⁴ K (azul).

Imagen del Sol tomada con el instrumento Broadband Filter Imager de Hinode. Créditos: Hinode/JAXA.



Sociedad Española de Astronomía

Universidad de Barcelona,