

ESPECTROPOLARIMETRÍA ULTRAVIOLETA

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



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

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

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

POLARIZACIÓN EN LÍNEAS ESPECTRALES

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

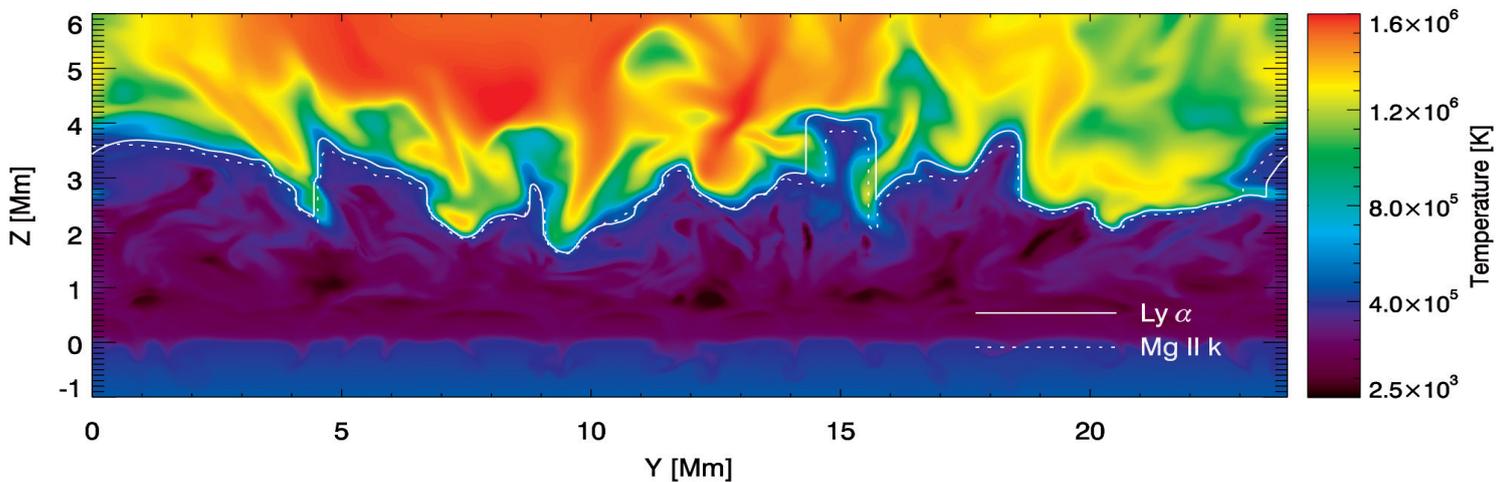


Figura 1: Visualización de la estructura de temperatura a través de un corte vertical en un modelo tridimensional (3D) de la atmósfera solar resultante de una simulación magneto-hidrodinámica (véase [Carlsson et al. 2016](#)). La curva continua muestra las alturas (Z) en este modelo de donde provienen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

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

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

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

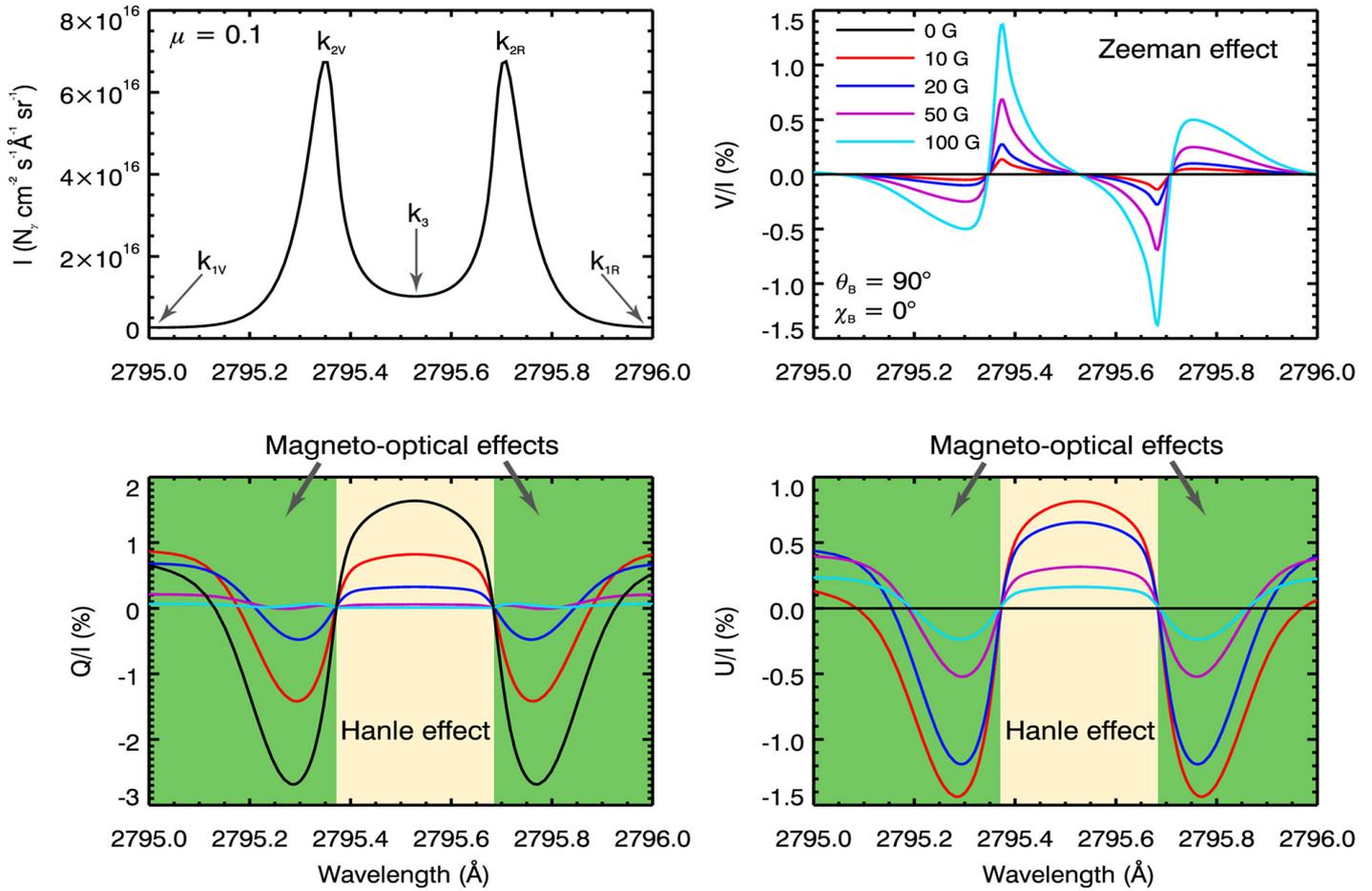


Figura 2: Ejemplo de los perfiles de Stokes I, Q/I, U/I y V/I de la línea k del Mg II debidos a la acción conjunta de los procesos de “scattering” y los efectos Hanle, Zeeman y magneto-ópticos. Los cálculos se han realizado en un modelo semi-empírico de la atmósfera solar incluyendo un campo magnético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

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

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

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

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

PREDICCIONES TEÓRICAS

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

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

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

(a) La línea Lyman- α del hidrógeno a 1215,67 Å

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

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

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

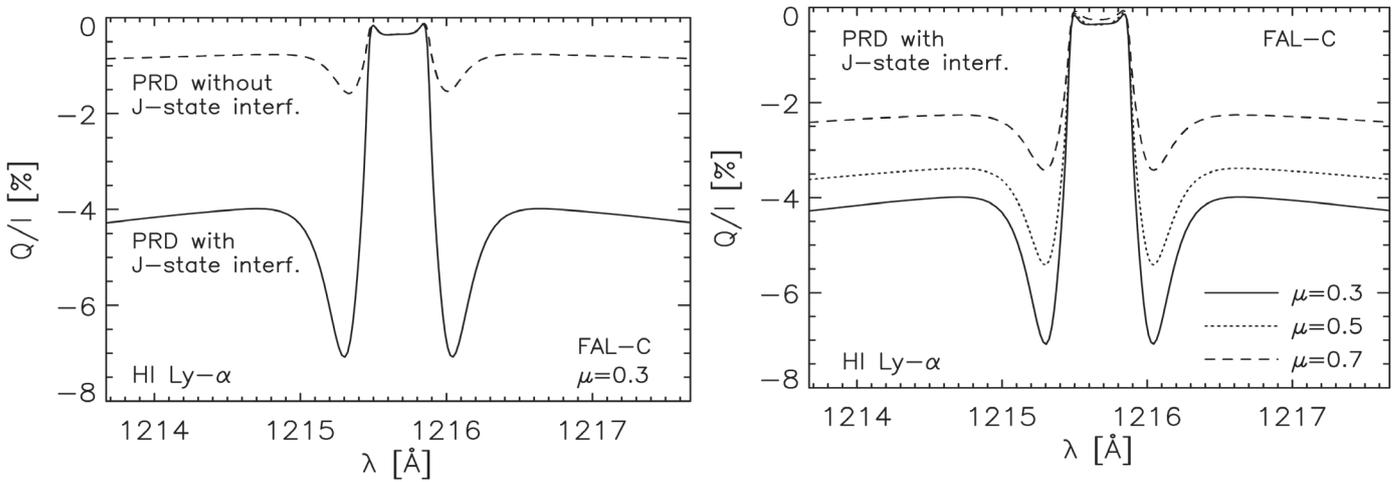


Figura 3: Variación con la longitud de onda del perfil Q/I de Lyman- α calculado en un modelo semi-empírico de la atmósfera solar sin campos magnéticos. Nótese en el panel izquierdo el impacto muy significativo en las alas de la línea causado por la interferencia cuántica entre los subniveles magnéticos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

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

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

CLASP: EL INSTRUMENTO

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

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

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

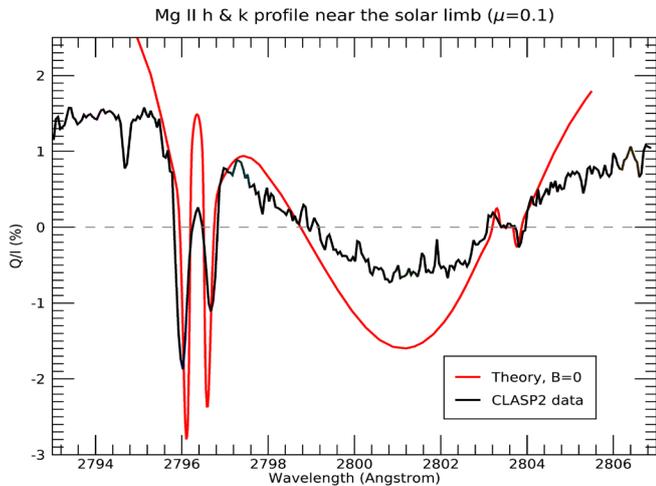


Figura 4: Variación con la longitud de onda del perfil Q/I en la región espectral de las líneas k (2796.4 Å) y h (2803.5 Å) del Mg II. La curva en negro muestra el perfil Q/I medido con CLASP-2 en una región en calma cercana al borde del disco solar (Rachmeler, Trujillo Bueno, McKenzie et al. 2020; en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

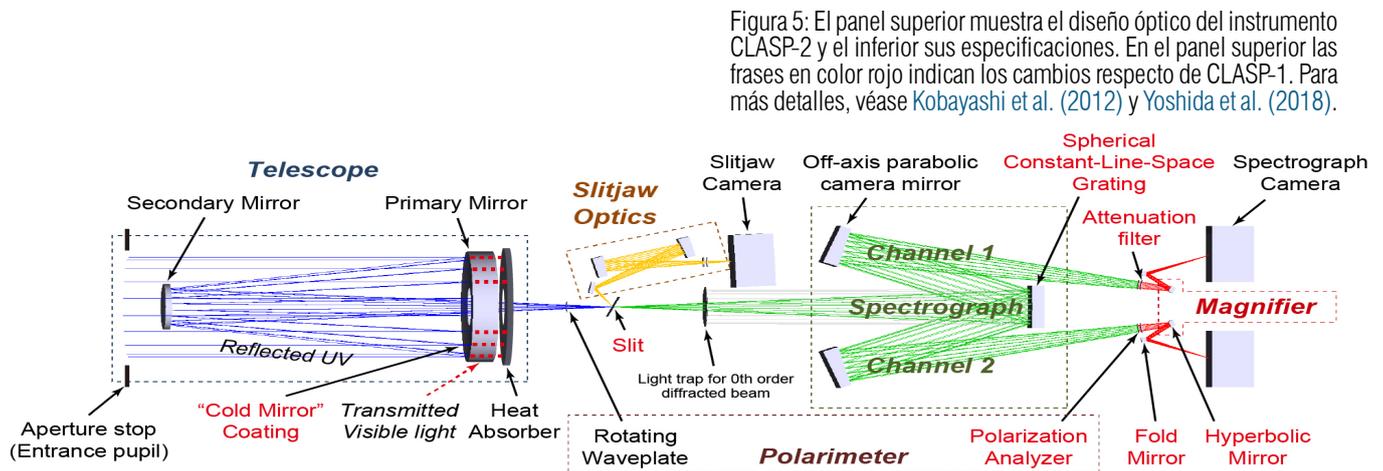


Figura 5: El panel superior muestra el diseño óptico del instrumento CLASP-2 y el inferior sus especificaciones. En el panel superior las frases en color rojo indican los cambios respecto de CLASP-1. Para más detalles, véase Kobayashi et al. (2012) y Yoshida et al. (2018).

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

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

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

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

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

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

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

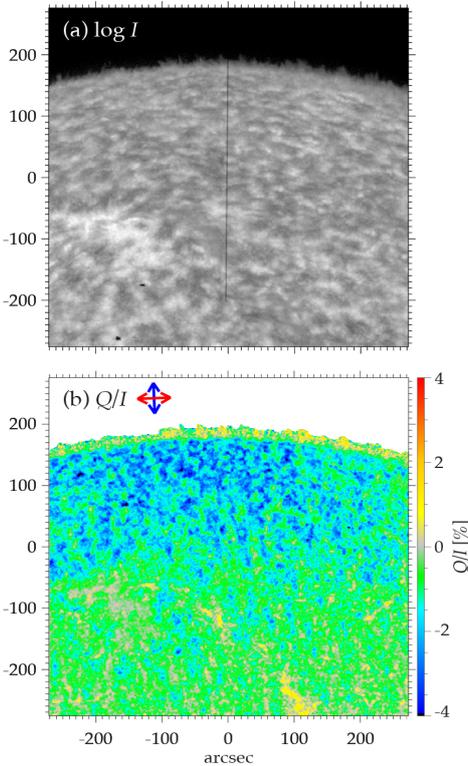
Además del espectro-polarímetro con rendija para medir los perfiles de Stokes con una resolución espectral de 0.1 Å, tanto CLASP-1 como CLASP-2 incluyeron otro instrumento (véase en la figura 5 la parte llamada “slit-jaw optics”) que nos permitió obtener

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

CLASP: LAS OBSERVACIONES

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

A: slit-jaw data



B: spectro-polarimeter data

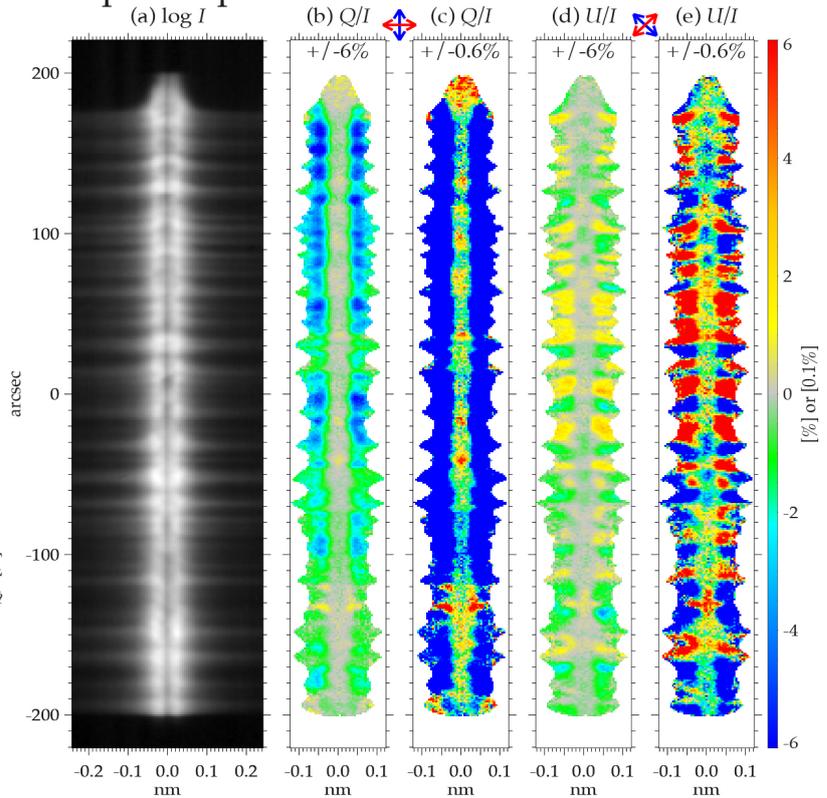


Figura 6: Las observaciones en Lyman- α logradas con CLASP-1 en una región en calma del disco solar. (A) Imágenes obtenidas con el filtro-polarímetro descrito en el texto: (a) I y (b) Q/I. La recta en negro en el panel (a) indica la rendija del espectrógrafo, la cual cubre 400 segundos de arco del disco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

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

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

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

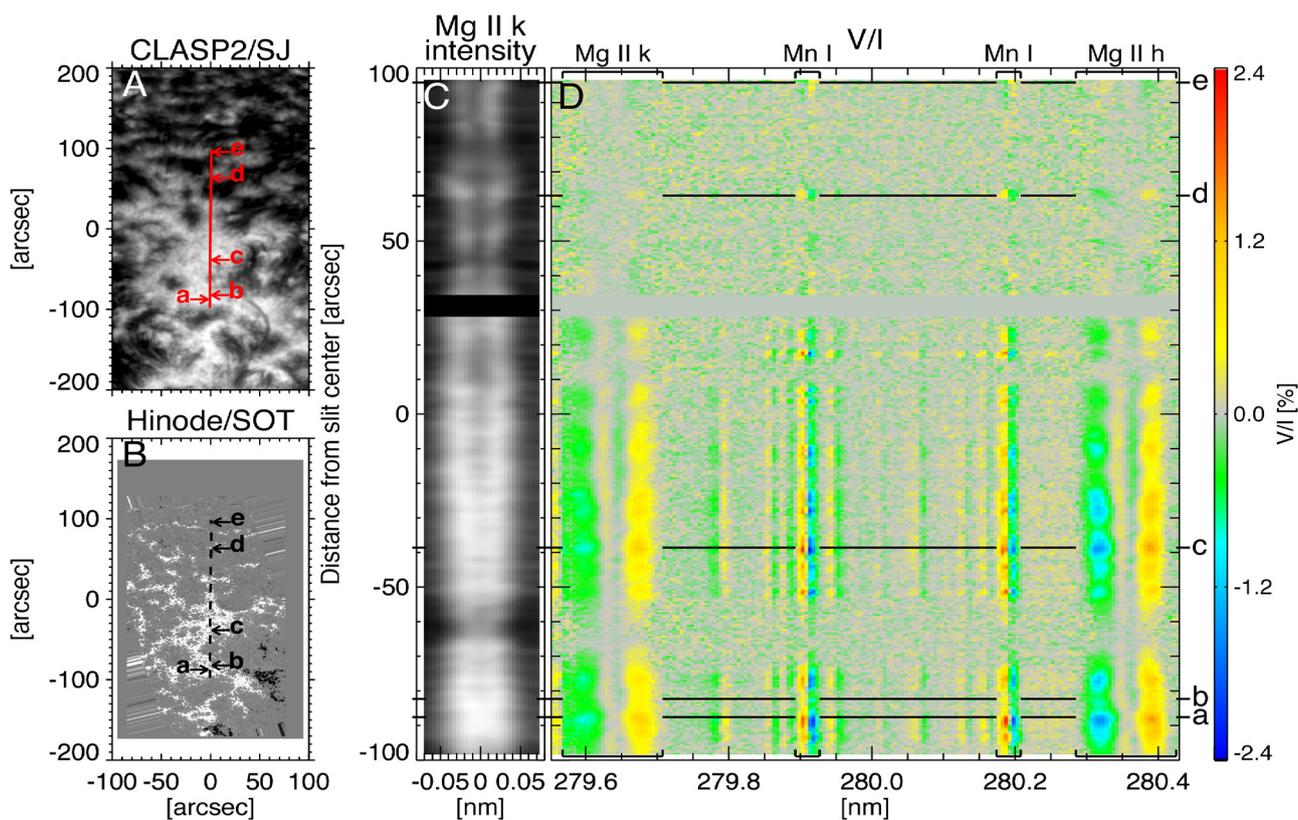


Figura 7: Los paneles izquierdos muestran la región activa (“plage”) observada por CLASP-2, con las rectas en color rojo y a rayas en negro indicando la rendija del espectrógrafo. Los paneles derechos muestran la variación de los perfiles de Stokes I (solo para la línea k del Mg II) y V/I a lo largo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

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

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

COMENTARIOS FINALES

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

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

REFERENCIAS:

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

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

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

