

HASTA y MICA: los telescopios solares de Argentina, centinelas australes del clima espacial

José I. Castro¹ y Carlos N. Francile¹

1- Observatorio Astronómico “Félix Aguilar” (Univ. Nac. de San Juan)

Resumen

Los telescopios solares HASTA (H-Alpha Solar Telescope of Argentina) y MICA (Mirror Coronagraph of Argentina) son instrumentos de observación de la cromosfera y de la corona solar respectivamente, montados bajo el convenio-marco germano-argentino de cooperación científica y técnica, y operados y mantenidos en el OAFa (UNSJ) con la cooperación de IAFE (CONICET) y los MPI de Garching y Lindau de Alemania. Ambos instrumentos se localizan, junto con otros instrumentos de observación astronómica, en la Estación de “El Leoncito”, zona precordillerana de la reserva del mismo nombre en la Provincia de San Juan (Argentina). El objetivo de ambos telescopios es estudiar el Sol y su modo de afectar al clima espacial. El clima espacial está determinado en forma casi exclusiva por la actividad de nuestra “estrella madre”, y afecta al clima terrestre, a la meteorología y a la actividad humana, tanto en la tierra como en el espacio. Los sistemas satelitales o los desplegados como redes superficiales de gran extensión en la superficie terrestre son altamente sensibles a tormentas electromagnéticas de origen solar, pudiendo llegar a ser afectados de modo permanente. De esto resulta que el monitoreo de la actividad solar y de sus fenómenos más energéticos (fulguraciones, eyecciones coronales de masa, etc.) trasciende la implementación de una base de datos para la investigación básica para constituir un sistema de alerta temprano para la protección de sistemas de comunicación, de provisión de energía, etc. En esta presentación realizamos una descripción somera de los instrumentos HASTA y MICA, de su condición actual y de sus posibilidades futuras, como monitores del clima espacial.

Introducción

Los telescopio HASTA y MICA operan continuamente desde 1998 en la Estación de Altura Carlos U. Cesco (EACUC) del Observatorio Astronómico “Félix Aguilar”

(OAFa) en El Leoncito, San Juan, Argentina, como parte de un acuerdo de cooperación científica de la que participan tres instituciones: *Max Planck Institut für Extraterrestrische Physik* (MPE), *Max Planck Institut für Sonnensystemforschung* (MPS) [ex *Max Planck Institut für Aeronomie* (MPAe)] , de Alemania, *Instituto de Astronomía y Física del Espacio* (IAFE, CONICET) y el *Observatorio Astronómico “Félix Aguilar”* (OAFa, UNSJ) de Argentina, para observar la atmósfera solar. La actividad de la atmósfera solar y específicamente los fenómenos impulsivos que en ella ocurren, los más energéticos del sistema solar, interactúan con la tierra de diferentes maneras, fundamentalmente perturbando el ambiente interplanetario cuyas condiciones locales se denominan clima espacial. El monitoreo constante de este clima espacial constituye un tema crucial en la actualidad con el objetivo de prevenir costosos desperfectos y daños en sistemas de comunicaciones, provisión de energía, etc., sin mencionar otros efectos que afectan a los sistemas climáticos terrestres y a su biología. El pronóstico de las condiciones del clima espacial está lejos de ser concretado, y todas las observaciones solares desde la tierra o el espacio constituyen una base de datos global con miras al estudio sistemático del Sol y sus efectos sobre la Tierra.

El Sitio de Observación

HASTA y MICA están situados en la EACUC en El Leoncito, San Juan, Argentina (longitud:-69.3°, latitud:-31.8°, altitud: 2370m), a 50 km al Este de la Cordillera de los Andes. Las principales características del sitio son:

- La extremadamente baja cantidad de agua precipitada y de humedad en el aire.
- El clima desértico, con escasa vegetación xerófila cercana que disminuye la presencia de insectos, y la lejanía respecto de colonias humanas que causen polvo, contaminación u otros disturbios atmosféricos debidos a su actividad.
- La ausencia de vientos fuertes, con predominio de vientos bastante suaves durante la mayor parte del día, la mayoría de los días.
- La ausencia de tráfico aéreo, civil o militar

Esto brinda mas de 300 días de observación al año con una cobertura de tiempo diaria promedio que se extiende de 11:30 a 20:30 UT, la que supera el período de tiempo de

observación de otros observatorios, como el *National Solar Observatory* y *Big Bear Solar Observatory* de EE.UU., por la mañana y durante el verano del hemisferio sur.

El Telescopio HASTA (Halpα Solar Telescope of Argentina)

HASTA es un telescopio solar refractor de 110mm de diámetro, con una longitud focal de 165cm. Proporciona imágenes del sol completo en la línea de emisión del hidrógeno H α ($656,27 \pm 0.11$) nm. Cuenta con un filtro Lyot-Öhmann el cual tiene un ancho de banda de 0,03 nm (FWHM) y su cámara CCD tiene una resolución de 1600x1200 píxeles; véase la Tabla 1 para más detalles. El tiempo exacto de adquisición de las imágenes se obtiene a través de un receptor GPS. El diseño de HASTA está optimizado para el registro de Fulguraciones Solares, pero su observación permanente del disco solar completo permite observar otras facetas de la actividad solar tales como regiones activas y filamentos.

Telescopio	Diámetro = 11 cm Distancia Focal = 165 cm Montura Ecuatorial Seguimiento del Sol Automático
Filtro	Lyot – Öhmann sintonizable Longitud de Onda Central = 656.2.7 nm Ancho de Banda = 0.03 nm Rango de Sintonía = ± 0.11 nm Observa en Línea Central y Alas de H Automáticamente
Cámara	CCD de 1600 x 1200 pixeles Dimensiones de Píxel de 7.4 x 7.4 μ m
Resolución	~ 1.2 arc seg máx.
Modos de Operación	Modo Patrulla: Imágenes cada ~ 3 min. Modo Fulguración: Imágenes cada 0.5 seg. máx. Detección Automática de Fulguraciones
Tiempo de Exposición	50 – 100 mseg
Ventana Horaria:	11:00 UT- 21:00 UT

Tabla 1: Principales Características del Telescopio HASTA

El instrumento tiene dos modos de funcionamiento: el modo Patrulla y el modo Fulguración. En el modo Patrulla, la cámara graba las imágenes solares con un intervalo de tiempo seleccionable entre 1 minuto y 5 minutos. La actividad solar se analiza en tiempo real y, si se detecta un evento rápido, la cámara cambiará a modo de alta

velocidad o modo Fulguración. En este modo puede tomar y almacenar hasta 2 imágenes en cuadro completo por segundo durante la fase Impulsiva de una Fulguración. La figura 1 muestra el telescopio HASTA en la actualidad.

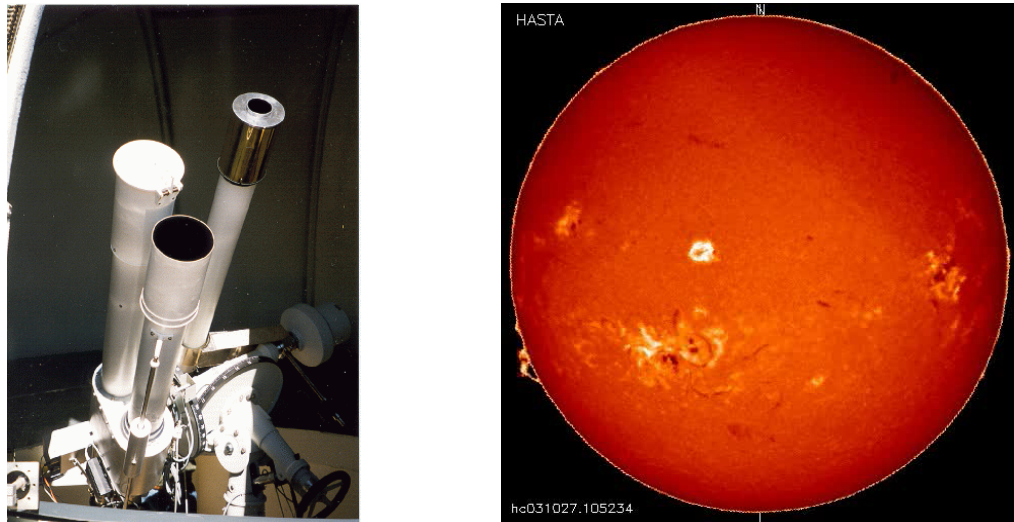


Figura 1: A la izquierda vista del telescopio HASTA y a la derecha una imagen típica obtenida con el telescopio

Por que se Observa el Sol en H

La Cromosfera Solar es la primera capa de la Atmosfera Solar y se extiende aproximadamente entre 500 y 2000 Km. de la superficie solar, hasta la denominada región de transición, con temperaturas entre 6000 y 10000 grados Kelvin. Está compuesta de materia en estado de gas y plasma cuyo principal componente es el Hidrógeno, y su comportamiento está regido por los campos magnéticos presentes en la región. En particular la línea de emisión-absorción del Hidrógeno H alfa permite visualizar la actividad de la cromosfera con gran detalle y los fenómenos transitorios que en ella se producen tales como fulguraciones (flares), filamentos y protuberancias, ondas Moreton, surgentes (surges), eyecciones coronales de masa (CME's) etc. alguno de los cuales se aprecian en la Figura 2. Entonces HASTA constituye un soporte fundamental para el estudio morfológico de toda la actividad cromosférica.

HASTA trabaja en colaboración con otros países formando parte de una red de observatorios solares, como por ejemplo:

- Max Millennium Program: Goddard Space Flight Center's Solar Data Analysis Center (SDAC) Dr. Dominic Zarro

- Max Millennium of Solar Flare Research

(http://mithra.physics.montana.edu/max_millennium/obs/GBO.html)

- European Grid of Solar Observations (<http://www.egso.org>) Dr. Bob Bentley

European Commission's Fifth Framework Programme

La base de datos de HASTA se aloja en el Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE)

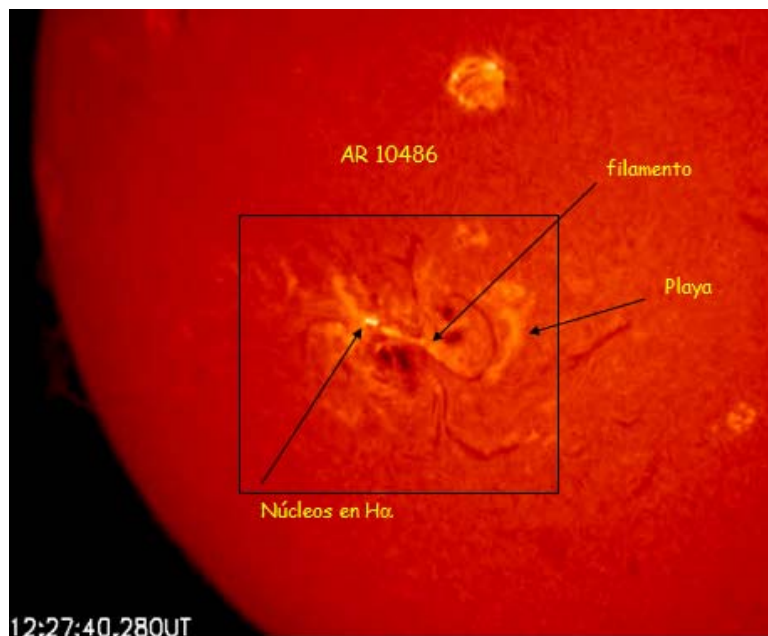


Figura 2: Detalles de la Cromosfera Solar en H alfa

Importancia de HASTA

La importancia de HASTA en el cono Sur se puede resumir en las siguientes características:

- Tiene muy buena resolución espacial

- Tiene alta resolución temporal
- Su ubicación geográfica es muy buena así como las condiciones climáticas regionales
- Es único en América del Sur
- Puede observar en el centro de la línea y alas de H alfa automáticamente.
- Dispone de una página web para obtener imágenes comprimidas en línea y búsqueda de datos observados a partir del año 2000 hasta la actualidad.

El Telescopio MICA (Mirror Coronagraph of Argentina)

MICA es un Coronógrafo de Espejos ocultado internamente diseñado para observar la Corona Solar entre 1.05 y 2.0 Radios Solares. Proporciona imágenes de la Corona en la línea de emisión del Fe XIV veces ionizado (530.3 nm), la línea de emisión del Fe X veces ionizado (637.4 nm) y H alfa (656,3 nm). Cuenta con una cámara CCD de 1280x1024 píxeles; véase la Tabla 2 para más detalles. Su objetivo es el estudio de la Morfología de la Corona de Líneas y el Disparo y Evolución Inicial de Eventos Dinámicos en la baja corona.

Telescopio	Coronógrafo de Espejos Campo de Visión de 1.05 a 2.0 Radios Solares Montura Ecuatorial
Rango Espectral	Línea Verde de Emisión de Fe XIV - 530.3 nm Línea Roja de Emisión de Fe X - 637.4 nm Línea de Emisión de H alfa 656.4 nm
Cámara	CCD de 1280 x 1024 pixeles Dimensiones de Píxel de 7.4 x 7.4 μm
Resolución	~4 arc seg. por píxel
Modos de Operación	Automática, con detección de condiciones atmosféricas mediante telescopios auxiliares “Sky Tester” y “Sun Tester”
Tiempo de Exposición	20-40 seg. (on-line) 6-12 seg. (off-line)
Ventana Horaria:	11:00 UT- 20:00 UT

Tabla 2: Principales Características del Coronógrafo MICA

MICA utiliza técnicas de imagen de banda angosta para conseguir resolver la Corona de Emisión cuya intensidad es mucho menor que el fondo del cielo y otras componentes coronales. Utiliza los telescopios auxiliares Sun Tester y Sky Tester para determinar las

condiciones atmosféricas automáticamente, las cuales son cruciales para la observación de la Corona Solar

Componentes de la Corona Solar

A continuación se describen las componentes de la Corona Solar, parte de la heliosfera inmediata al Sol, caracterizada por ser un plasma de muy alta temperatura:

- ***Corona de Líneas de Emisión (E)*** Generadas por varios átomos e iones presentes en la Corona Solar. Las líneas mas intensas son las generadas por los iones de Fe XVI y FeX (línea verde y roja respectivamente, las que se corresponden a 1.8 y 1.05 millones de grados Kelvin). Tiene varias líneas en UV y EUV y presenta grandes gradientes radiales y estados de polarización.
- ***Corona de Fraunhofer (F)*** Está formada por la luz blanca dispersada en partículas de polvo, tiene las mismas componentes espectrales de la fotosfera, incluidas las líneas de absorción de Fraunhofer y poca polarización.
- ***Corona de Contínuo (K)*** Luz blanca fotosférica dispersada en electrones libre. Su intensidad es proporcional a la densidad de electrones presentes. No presenta las líneas de absorción de Fraunhofer y está fuertemente polarizada paralelamente al limbo solar.
- ***Corona Térmica (T)*** Compuesta de la radiación térmica de las partículas de polvo, es raramente visible.

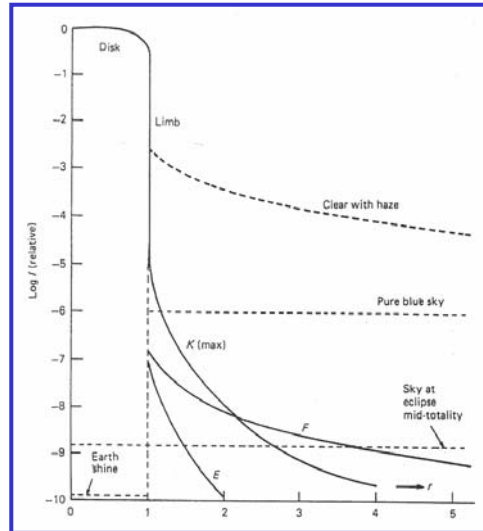


Figura 3: Intensidad relativa de las componentes de luz coronal y del cielo como función de la distancia solar en radios solares. La intensidad relativa está normalizada a la intensidad en el centro del disco solar. (Ref: van der Hulst, 1953.)

Esquema Óptico de MICA:

MICA internamente dispone de dos semi-espejos parabólicos (M1 y M3) y un espejo convexo en el foco de la parábola (M2) que dispone de un orificio que hace las veces de ocultador. Ver Figura 3: Así la imagen del disco solar sale fuera del telescopio. La imagen de la corona atraviesa los filtros y alcanza el CCD. La luz dispersada en la abertura de entrada es detenida en el llamado “Lyot Stop” de manera que no alcanza el CCD. Al CCD arriban todas las componentes coroneales mas la luz dispersada remanente en el telescopio.

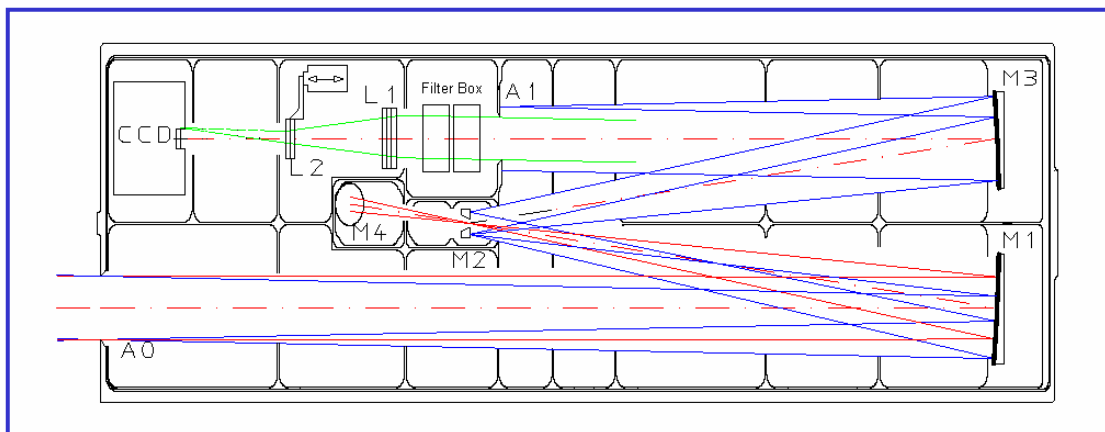


Figura 4: Esquema Óptico de MICA, en Rojo la luz solar fotosférica (disco solar), en Azul la luz solar difractada en los bordes de A0 y en Verde la luz solar dispersada más la luz coronal

En la tabla 3 se describen las características ópticas de MICA

Para resolver la Corona de Emisión, MICA utiliza un par de filtros, uno de banda angosta (0.15nm FWHM) centrado en la línea de emisión, y uno de banda mas ancha (1nm FWHM) centrado cerca de la línea pero sin incluirla y lejos de esta a fin de resolver el continuo. Las imágenes obtenidas en cada uno de estos filtros son restadas a fin de separar la Corona de Emisión del resto de las componentes coronales, el fondo del cielo y la luz dispersada en el instrumento. En la Tabla 5 se describen las características de los filtros

Elemento	Tipo	Apertura (mm)	Curvatura (mm)	Comentarios
A0	Abertura Circular	59	...	Entrada de Luz
M1	Parábola fuera de eje	90	Longitud Focal=750	Espejo primario
M2	Esfera Convexa	Diámetro Interior = 7 Diámetro Exterior=20	Radio=2422	Ocultador
M3	Parábola fuera de eje	90	Longitud Focal=750	
S	Obturador	40	---	Mecánico
A1	Abertura Anular	Diámetro Interior=38.4	---	Stop de Lyot
L1	Telelentes			
CCD	Cámara CCD	16 um/pixel	---	1280x1024 (~3.8 arcseg/pixel)

Tabla 3: Características ópticas de MICA

	(nm)	<i>FWHM</i> (nm)	<i>Máxima Transmítancia</i>	<i>Flatness</i>
<i>Fe XIV</i> (línea)	530.3	0.15	52 %	/4/45mm
<i>Fe XIV</i> (continuo)	526.0	1	56 %	/4/25mm
<i>Fe X</i> (línea)	637.4	0.15	57 %	/4/45mm
<i>Fe X</i>	634.0	1	36 %	/4/25mm

(continuo)				
------------	--	--	--	--

Tabla 4 : Características de los filtros de MICA

En la figura 6 se puede observar una imagen de la corona solar obtenida con MICA

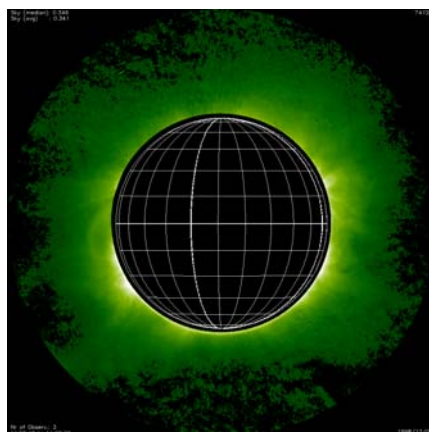


Figura 5: Imágen de la Corona Solar en FeXIV obtenida con MICA

Los Instrumentos Auxiliares Sky Tester y Sun Tester

Sky Tester es un pequeño coronógrafo externamente ocultado que registra la intensidad del fondo de cielo hasta 10 radios solares. Su función es detectar la presencia de nubes, las cuales incrementan la intensidad total medida por el Sky Tester.

Sun Tester mide la intensidad total del disco solar. De la comparación entre estos valores se puede determinar la calidad del día de observación.

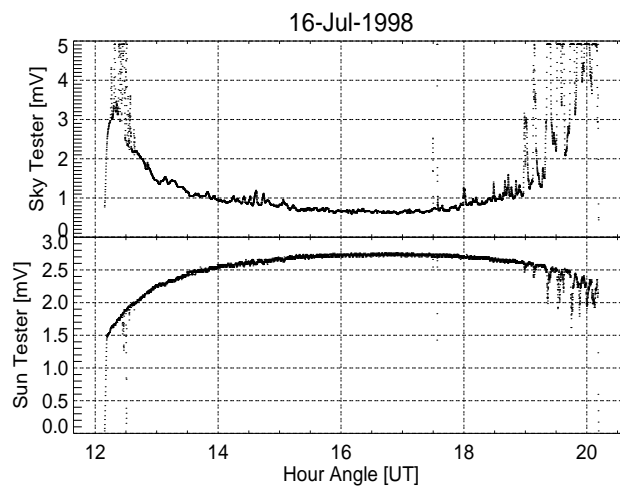


Figura 6: Datos Típicos medidos por el Sky Tester (parte superior) y Sun Tester (parte inferior) de un día de observación

En la Figura 6 se observa que al medio día (parte central del gráfico), la intensidad del Sky tester es menor y la del Sun Tester es mayor debido a la menor masa de aire. La presencia de nubes finas (a la derecha entre las 19 y 20 horas) incrementa el valor del Sky Tester y disminuye el valor del Sun Tester. MICA suspende la observación en caso que las condiciones atmosféricas no permitan resolver la corona solar. La presencia de nubes gruesas, hace decaer los valores de ambos instrumentos auxiliares.

La Corona Solar Dinámica

La corona solar está conformada por el denominado Viento Solar, que es un continuo flujo de plasma que emerge del Sol y se desplaza por el espacio interplanetario. Sin embargo este Viento Solar no es constante y presenta características que dependen directamente de la actividad solar. Así en los agujeros coronales el viento es rápido (400 a 800 Km/seg) y de baja densidad, y en las regiones activas el viento es lento (250 a 400 Km/seg) y de mayor densidad. En determinadas situaciones aparecen eventos que producen un cambio observable en la estructura coronal en escalas de tiempo de minutos a horas, con estructuras más brillantes que se desplazan en sentido radial, a veces con apariencia de globo o halo y que se denominan Eyecciones de Masa Coronales (CME's). Estas presentan velocidades mayores que el viento solar circundante por lo que producen onda de choque con el mismo. Cuando se desplazan en dirección a la Tierra impactan con la magnetosfera terrestre y suelen producir diversos fenómenos geomagnéticos que se denominan Tormentas Solares, entre los que se destacan las Auroras Boreales. La cantidad de CME que se producen depende del Ciclo Solar, así como la magnitud de las mismas. Su presencia en el espacio interplanetario conforma el denominado Clima Espacial.

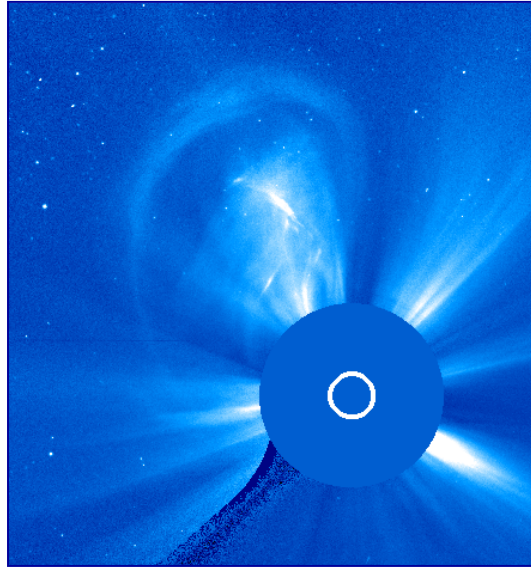


Figura 7: Eyección de Masa Coronal observada con LASCO C3 a bordo del satélite SOHO, donde se aprecia una cáscara exterior brillante, seguida de una zona mas oscura y un núcleo brillante

HASTA/MICA y el Clima Espacial

El Clima espacial se refiere a las condiciones en el Sol y en el Viento Solar, la Magnetosfera, la Ionosfera, y la Termosfera que puede influenciar el desempeño y la fiabilidad de sistemas tecnológicos espaciales y en tierra, que pueden afectar de alguna manera la vida humana. Su origen es la variabilidad del Sol y depende fundamentalmente de las violentas liberaciones de materia y energía que se producen en la atmósfera solar y que viajan hasta la Tierra. Particularmente hay tres fenómenos solares que producen las llamadas Tormentas Solares y que tienen gran impacto en la Tierra:

Rayos X, gamma, UV, Radio Bursts: Se producen en fulguraciones (flares) y generan radiación electromagnética en todas las bandas, particularmente Rayos X, gamma y UV de considerable energía. Estos rayos llegan casi inmediatamente a la Tierra y duran de 1 a 2 horas. Sus efectos son la interferencia en satélites de comunicaciones, radares y bandas de radio. Las fulguraciones son detectadas por HASTA en la banda visible del espectro.

Eventos de Protones: Se producen en Fulguraciones y Eyecciones de Masa Coronales (CMEs) y están compuestas de protones, electrones e iones por encima de 100MeV. Llegan a la Tierra luego de entre 15 minutos y unas horas de haberse producido y su duración es de días. Producen desorientación de satélites, lecturas falsas de sensores, daño en naves espaciales, irradiación en aviones que vuelan a gran altura, y representan un gran peligro para los astronautas. Estos eventos pueden ser detectados por MICA y HASTA.

Tormentas Geomagnéticas: Se producen en Eyecciones de Masa Coronales y en emisiones de Agujeros Coronales. Llegan a la Tierra luego de 2 a 4 días de haberse producido y su duración es de varios días. Están compuestas de partículas de baja y media energía. Producen fenómenos de carga y arrastre en satélites, errores de guía de satélites, interferencias de radares, anomalías en radio propagación, cortes de energía por inducción electromagnética, auroras, calentamiento de la alta atmósfera y efectos en sistemas biológicos. Algunas son detectadas por MICA y HASTA.

Estos efectos hacen que sea primordial la detección temprana de estos eventos solares, a fin de evitar costos económicos considerables. En este sentido los telescopios en tierra y el espacio dedicados a la observación solar conforman una red de alerta de las condiciones del clima espacial.

El pronóstico del Clima Espacial

En el estado actual del conocimiento del Sol y sus relaciones con la Tierra, no se pueden predecir ni las fulguraciones solares ni las eyecciones de masa coronales antes que se produzcan. Los eventos solares solo se pueden detectar luego de producidos y aún así las predicciones sobre si una tormenta solar llegará o no en la Tierra solo son acertadas en un 75% de los casos. Y esto incluye a los eventos más destructivos. En este sentido los avances futuros en el estudio de la física del sol parecen ser cruciales para avanzar en el pronóstico del Clima Espacial, estudios de los que colaboran activamente HASTA y MICA

Referencias:

- L. Balmaceda, A. Dal Lago, G. Stenborg, C. Francile, W.D. Gonzalez and R. Schwenn
“Continuous tracking of cmes using MICA, and LASCO C2 and C3 coronagraphs”
Advances in Space Research, Volume 32 Issue 12, 2625-2630, Año 2003
- G. Stenborg, L. G. Bagalá, O. H. Bauer, R. Fernández Borda, C. Francile, G. Haerendel, M. G. Rovira, and R. Schwenn
“First Combined Observations in the German-Argentinean Solar Observatory: Correlations in Quiet and Eruptive Phenomena at the Limb”.
Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics (JASTP), 62/16, 1553-1559, 2000.
- Bagalá L.G., Bauer O.H., Fernández Borda R., Francile C., Haerendel G., Rieger R. and Rovira M.G.
“The New H-Alpha Solar Telescope at the German-Argentinean Solar Observatory”
Proceedings 9th European Meeting on Solar Physics: "Magnetic Fields and Solar Processes", ESA SP 448, 469, 1999.
- Guillermo Stenborg, Rainer Schwenn, Nandita Srivastava, Bernd Inhester, Borut Podlipnik, Marta Rovira, and Carlos Francile
“Recent observations of the inner solar corona with a new ground-based mirror coronagraph in Argentina (MICA)”
Solar Wind 9, edited by S.R.Habbal, R.Esser, J.V.Hollweg, and P.A.Isenberg,
American Institute of Physics-Conference Proceedings AIP - CP 471, 561-564, 1999.
- Guillermo Stenborg, Rainer Schwenn, Nandita Srivastava, Bernd Inhester, Borut Podlipnik, Marta Rovira, and Carlos Francile
“MICA: The mirror coronagraph for Argentina”
 - Space Science Reviews (SSR), 87, Numbers 1-2, 307-310, 1999. Springer Netherlands
ISSN: 0038-6308
 - Coronal Holes and Solar Wind Acceleration: Proceedings of the Soho-7 Workshop, Held at Asticou Inn in Northeast Harbor, Maine, U.S.A., from 28 September -1 October, 1998 - Autor John L. Kohl, Steven R. Cranmer
Springer, 1999 - ISBN 0792358287, 9780792358282 - 368 páginas
- Rovira M.G., L.G. Bagala, O.H. Bauer, R. Fernández C. Francile, G. Haerendel, E. Rieger
“H-Alpha Solar Telescope for Argentina (HASTA)”
Conferencia satélite de la IUGG, GA 4.02 Conference "CMEs, Eruptions and Flares: Onset and Relationships", IUGG 99, Birmingham, 18-30 July, 1999.)