

# Observations of the Sun in Action

## Observaciones del Sol en Acción

M. G. Rovira

Instituto de Astronomía y Física del Espacio, IAFE-CONICET  
CC.67, Suc.28, 1428 Buenos Aires, Argentina.

### Abstract

The knowledge of the solar active phenomena requires their observation from the space to cover the ranges of the electromagnetic spectrum unreachable from the ground. Presently, two missions devoted to the study of the Sun are in operation: the satellites Yohkoh and Ulysses. Their recent results are briefly analyzed and compared with discoveries of the solar dedicated satellites that were active in the 70's and 80's: the space station Skylab, the SMM and the Hinotori. The objectives and integration of the incoming SOHO satellite that will be launched in 1995, to observe continuously the Sun from the Lagrange L1 point, are also described.

### Resumen

La comprensión de los fenómenos activos del Sol requiere su observación desde el espacio para cubrir los rangos del espectro electromagnético no accesibles desde tierra. Actualmente están en operación dos misiones dedicadas al estudio del Sol: los satélites Yohkoh y Ulysses. Se analizan sus resultados recientes comparándolos con los descubrimientos de los satélites solares principales de las décadas del 70 y 80: Skylab, SMM y Hinotori. Se describen también los objetivos e integración del satélite SOHO que observará continuamente el Sol, en una época de baja actividad, a partir de 1995, desde el punto de Lagrange.

Las capas de la atmósfera solar por encima de la cromósfera no se pueden estudiar con observaciones desde Tierra por dos razones principales:

1- son tan tenues con respecto a la fotosfera, que cualquier emisión que ellas produzcan en el rango visible del espectro electromagnético no se puede distinguir sobre el fondo fotosférico mucho más intenso;

2- se encuentran a temperaturas más altas que la fotosfera dando origen a emisión de líneas debidas a niveles de excitación o ionización altos. Estas líneas son generalmente emitidas en las regiones espectrales del ultravioleta y rayos X, a las cuales la atmósfera terrestre es opaca.

Por estas razones resultan de fundamental importancia las observaciones realizadas desde globos, cohetes o satélites, juntamente con mediciones en el rango visible y de radio, además de magnetogramas vectoriales, realizadas desde observatorios terrestres.

El Sol fue el primer objeto celeste observado desde el espacio: el 10 de octubre de 1946 el Laboratorio de Investigación Naval (NRL) de los Estados Unidos lanzó un cohete V2 a una altura de 160 km con un espectrógrafo sensible hasta 2 000 Å. Ocho satélites, hoy comparativamente pequeños y simples, dedicados a observaciones solares, los Observatorios Solares en Órbita (OSO), volaron entre los años 1962 y 1975.

En Mayo de 1973 fue puesta en órbita la estación espacial Skylab. Los 8 telescopios que llevaba a bordo observaron el Sol entre 2 y 7000 Å. Dos de ellos eran filtros en  $H\alpha$  utilizados para el apuntamiento e identificación de las regiones activas. Los restantes incluían 2 telescopios en rayos X blandos (0.2-6 keV), 3 en UV y un coronógrafo en luz visible.

Estos instrumentos permitieron observar la corona en rayos X blandos (0.2-6 keV) con una resolución que no había sido alcanzada hasta entonces comprobándose que la corona "quieta" no existe estando constituida fundamentalmente por arcos magnéticos. Los resultados más novedosos fueron los relacionados con los agujeros coronales y los puntos brillantes.

Los agujeros coronales son extensas regiones de densidad y temperatura mucho menores que la corona que las rodea. Es un fenómeno que se distingue principalmente en rayos X y UV. También en rayos X y UV se observan los puntos brillantes que, aunque de dimensiones más pequeñas que las manchas, están igualmente asociados a intensos campos magnéticos.

En febrero de 1980, cerca del máximo de actividad del ciclo solar 21, entró en órbita el satélite Solar Maximum Mission (SMM), dedicado a la observación del Sol. Entre sus instrumentos llevaba un espectrómetro de rayos X duros, HXRBS, con una resolución temporal de 128 ms y 15 canales de energía entre unos 30 y 500 keV; un espectrómetro de imágenes en rayos X, HXIS, (3.5-30 keV) que fue el primero en obtener imágenes del Sol en rayos X duros; un espectrómetro de rayos  $\gamma$ , GRS, (0.3-10 MeV) con mayor sensibilidad que los que habían volado hasta entonces incluyendo la posibilidad de detectar directamente neutrones rápidos producidos por los iones acelerados en las fulguraciones. Un espectrómetro de rayos X blandos, BCS, (1.4-22.5 Å); un espectrómetro y polarímetro en UV, UVSP, (1500-3600 Å) que podía obtener imágenes en un área de 256" x 256" en pasos de 1"; un coronógrafo y polarímetro, C/P, que observaba en el rango entre 4448 y 6585 Å; los que junto con un radiómetro de alta sensibilidad, ACRIM, completaban el conjunto de instrumentos a bordo del SMM.

Entre los principales resultados del SMM podemos citar los relacionados con las imágenes en rayos X duros (16-30 keV) obtenidas por el HXIS. Las observaciones permitieron distinguir, durante la fase impulsiva de las fulguraciones solares, que la emisión se concentra en áreas pequeñas y localizadas de distinta polaridad magnética que se asocia con los extremos de los arcos magnéticos en los que se desarrolla el fenómeno.

Dentro de una incerteza de 1 s, el GRS observó que la emisión de fotones con energías desde decenas de keV a varios MeV se realiza simultáneamente en la fase impulsiva de algunas fulguraciones. Este resultado novedoso es muy importante porque implica que tanto los electrones como iones son acelerados e interactúan con el blanco al mismo tiempo.

Las observaciones en CaXIX,  $\lambda$  3.176 Å del BCS permitieron observar

el corrimiento de la línea producido por el fenómeno conocido como “evaporación cromosférica” por el cual material de la cromósfera es inyectado en el arco magnético aumentando su densidad.

Se obtuvieron las primeras mediciones directas del campo magnético en la región de transición utilizando la línea del CIV  $\lambda$  1548 A observada por el instrumento UVSP.

Los transitorios coronales, que ya habían sido estudiados con el Skylab, fueron analizados en más detalle con la resolución espacial del C/P.

Uno de los descubrimientos más importantes fue el realizado con el ACRIM que permitió, mediante el ajuste lineal por cuadrados mínimos de la curva de irradiancia en función del tiempo para el período 1980- 1985 determinar un decrecimiento de la “constante solar” de  $-0.019\%/año$ .

En febrero de 1981 fue puesto en órbita el satélite japonés HINOTORI dedicado a observaciones solares en altas energías. Más recientemente, el 30 de agosto de 1991 fue lanzado otro satélite japonés, el Yohkoh. Es un proyecto del Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japón, con importante participación de otras instituciones japonesas y de grupos de investigación de los Estados Unidos y del Reino Unido. El objetivo principal es el estudio de los fenómenos solares de alta energía. Con este propósito lleva a bordo cuatro instrumentos científicos:

- 1- HXT, telescopio de rayos X duros
- 2- SXT, telescopio de rayos X blandos
- 3- WBS, conjunto de espectrómetros de banda ancha y
- 4- BCS, conjunto de espectrómetros de cristal de Bragg.

El telescopio de rayos X duros obtiene imágenes del Sol completo en 4 bandas de energía entre 13.9 y 92.8 keV. Estas son las primeras imágenes en energías de más de 30 keV, donde la radiación X se debe principalmente

a partículas no-térmicas de alta energía. La resolución temporal es de 0.5 seg y la resolución espacial de 5 seg de arco.

El telescopio de rayos X blandos, SXT, tiene una resolución angular de 2.5 seg de arco contando con 5 filtros de análisis que cubren un rango de longitudes de onda entre 2 y 50 A. Tanto puede tomar imágenes del Sol completo como partes restringidas, por ejemplo, seleccionando las regiones más brillantes y operando en modo "flare". Observa continuamente la corona solar mostrándola como un fenómeno dinámico. En la Figura 1 se observa una imagen del Sol completo tomada por este instrumento el 23 de febrero de 1995.

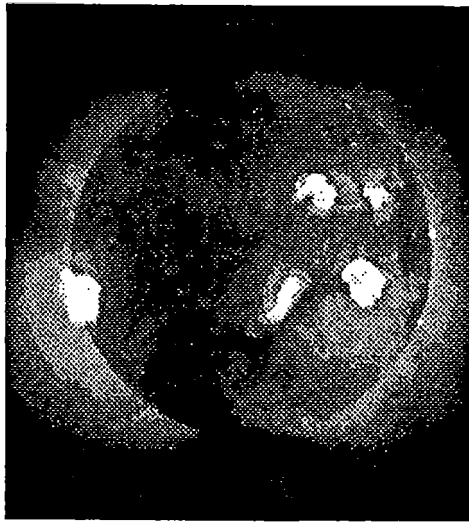


Figura 1. Imágen del Sol tomada por el instrumento SXT a bordo del satélite Yohkoh.

El WBS comprende un conjunto de espectrómetros de banda ancha cuyo rango de operación se extiende desde los rayos X blandos ( $\approx 1\text{keV}$ ) hasta los rayos gamma ( $< 100\text{MeV}$ ).

El BCS está compuesto por 4 cristales de Bragg con bandas de lon-

gitudes de onda angostas que cubren las principales líneas de emisión de los siguientes iones: SXV, CaXIX, FeXXV y FeXXVI. A partir de estas líneas se puede obtener valiosa información sobre las condiciones del plasma solar.

Una característica importante de este satélite es que los 4 instrumentos están co-alineados y operan simultáneamente. Esta combinación resulta de gran utilidad para investigar tanto la morfología como las condiciones físicas de los fenómenos de alta energía y alta temperatura.

Alguno de los primeros resultados confirmaron observaciones obtenidas con satélites anteriores, aunque generalmente con instrumentos de menor resolución espacial y temporal. Los fenómenos verdaderamente novedosos descritos hasta ahora como consecuencia de las observaciones del Yohkoh son:

1. Expansión ocasional o continua de la corona sobre regiones activas a velocidades de unos pocos km a unas pocas decenas de km por segundo. Estas expansiones ocurren aún en ausencia de fulguraciones y la estructura general de la región tiende a mantenerse. Este fenómeno no es previsible en la representación convencional en la cual la corona, de densidad menor y temperatura más alta, que se encuentra sobre las regiones activas, es retenida por los intensos campos magnéticos de las manchas solares en equilibrio magnetohidrostático.

2. El SXT reveló la presencia de estructuras tipo jet, aumento transitorio en la emisión de rayos X desde fuentes con movimiento aparentemente colimado. Comparando con observaciones simultáneas en H $\alpha$ , estos movimientos parecen ser flujos reales de plasma. Muchos de ellos están asociados a puntos brillantes en rayos X, regiones activas o regiones con flujo emergente.

Resultados igualmente interesantes se obtuvieron de los otros instrumentos, los que por el objetivo y la extensión de esta revisión no vamos a mencionar. Es de destacar, sin embargo, la capacidad del Yohkoh para observar fenómenos solares en un amplio rango de intensidad, desde débiles

estructuras coronales hasta fulguraciones brillantes, así como la posibilidad de tomar imágenes con una alta cadencia temporal, lo que permite, entre otras cosas, obtener observaciones prácticamente continuas en rayos X blandos de la evolución de una fulguración desde antes de su disparo hasta la recuperación de las condiciones coronales una vez concluido el fenómeno.

De confirmarse la expansión de la corona sobre regiones activas, esta puede tener influencias sobre el movimiento del viento solar y, en consecuencia, sobre el modelado de otros vientos estelares basado en el modelo convencional del Sol.

Otro de los comportamientos enigmáticos del Sol al que los instrumentos del Yohkoh pueden aportar información son los agujeros coronales, los que rotan como un cuerpo rígido mientras todas las otras manifestaciones de actividad superficial tienen rotación diferencial.

Este satélite sigue activo proveyendo importante y abundante información principalmente de la corona solar.

El Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO) es un satélite de NASA de 16 000 kg que lleva 4 instrumentos que observan radiación X y gamma cubriendo casi 6 décadas de energía, desde alrededor de 15 keV hasta 30 GeV, y también neutrones muy energéticos. Fue lanzado en abril de 1991 y es la primera oportunidad en que se pueden realizar observaciones simultáneas en un rango tan amplio.

Aunque el Sol no está incluido entre los objetivos científicos centrales de la misión del CGRO, sus observaciones constituirán un valioso aporte para el estudio de las fulguraciones solares. El BATSE (Burst and Transient Source Experiment) provee observaciones con mayor sensibilidad que la del experimento similar que voló a bordo del SMM. Consta de 8 módulos iguales colocados en los extremos del CGRO lo que permite cubrir todo el cielo. Cada módulo contiene un detector de gran área (LAD) y otro espectroscópico (SD). Entre ambos cubren desde los 15 keV hasta aproximadamente los 100 MeV. En uno de sus modos de operación el LAD

obtiene datos cada 0.064 seg.

El Ulysses es una misión conjunta de ESA y NASA cuyo objetivo primario es el estudio de las propiedades del medio interplanetario y del viento solar como función de la latitud heliográfica. Ha permitido realizar, por primera vez, mediciones "in situ" fuera del plano de la eclíptica y sobre los polos del Sol.

Este satélite, de 370 kg, llegó a Jupiter en febrero de 1992, 16 meses después de su lanzamiento, y el campo gravitatorio de este planeta lo desvió a una órbita de alta inclinación al sur del plano de la eclíptica pasando entre mayo y setiembre de 1994 sobre el polo sur solar a una distancia de 2.3 UA. Entre mayo y setiembre de 1995 se producirá su pasaje por encima del polo norte del Sol.

Por último, en esta breve síntesis que pretende describir los satélites más importantes que realizaron observaciones solares durante las últimas tres décadas mencionaremos el SOHO (Solar Heliospheric Observatory). Este satélite, instrumentado por laboratorios de los EEUU y Europa, será lanzado en el transcurso de 1995. Su misión está dedicada a mejorar nuestra comprensión de la atmósfera solar exterior y del viento solar. Para ello llevará un conjunto de telescopios que permitirán el estudio de fenómenos que se inician debajo de la fotosfera y que se propagan a través de la fotosfera, cromósfera, región de transición y corona.

Las investigaciones se dividen en tres áreas principales: estudio del interior del Sol o heliosismología; estudio de la atmósfera solar; y mediciones "in situ" del viento solar. Las dedicadas a la heliosismología estudiarán principalmente aquellas partes del espectro de las oscilaciones solares que no pueden observarse desde Tierra.

Los instrumentos que estudian la atmósfera solar son fundamentalmente espectrómetros que permitirán el estudio de líneas de emisión y absorción producidas por los iones presentes en sus diferentes regiones. A partir de esta información será posible determinar temperaturas y velocidades de las cambiantes estructuras. Estas mediciones serán complemen-



tadas con el estudio de la composición y energía del viento solar. Esto se realiza con la ayuda de detectores de partículas que toman muestras del viento solar a medida que éste pasa a través de ellos.

El SOHO será colocado en órbita alrededor del punto de Lagrange Sol-Tierra: L1, a aproximadamente  $1.5 \times 10^6$  km de la Tierra. Esto permite la observación continua del Sol, y además, al estar permanentemente fuera de la magnetosfera terrestre, tomar muestras del viento solar no alterada por ésta.