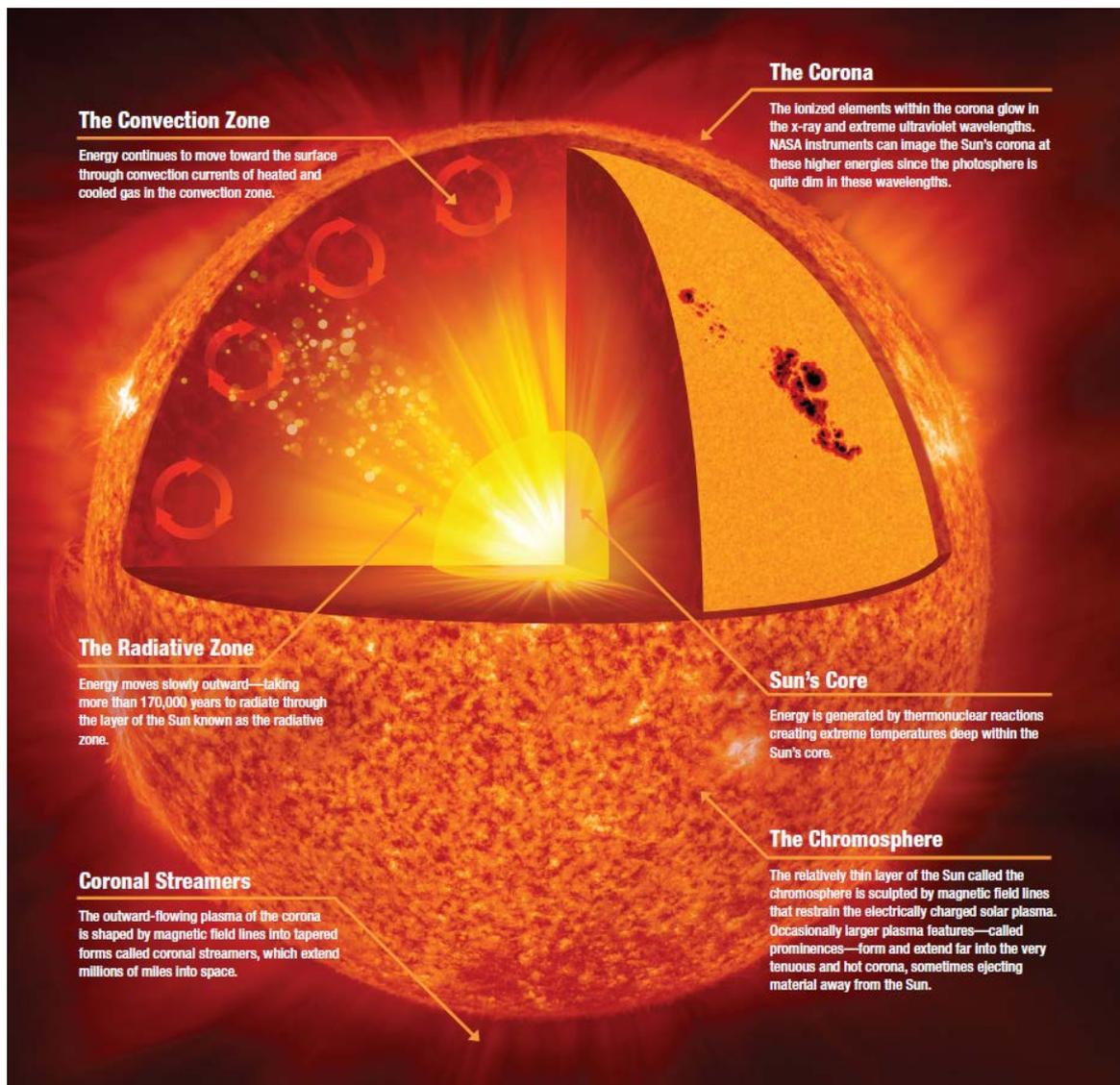


La Estructura del Sol

CESAR's Booklet



Cómo funcionan las estrellas

Para conseguir que una estrella sea estable, la energía que emite debe de ser la misma que produce. Tiene que haber un equilibrio. La principal fuente de energía de una estrella es la fusión nuclear, especialmente la cadena protón/protón que transforma hidrógeno en helio.

La energía generada en el núcleo es transportada hacia el exterior mediante dos mecanismos: radiación y convección. Los procesos de radiación consisten tan solo en los fotones emitidos por el Sol, y los convectivos hace referencia a grandes movimientos de material en su interior, como se puede ver en la imagen de la portada.

Los científicos llaman a este balance **equilibrio hidrostático** . Hay dos fuerzas principales actuando en una estrella:

- **Contracción gravitatoria:** debida a las capas superiores, que tienden a contraer toda la masa al centro.
- **Presión de radiación:** producida por las capas internas, y hace que el material salga al exterior.

Las capas del Sol

El Sol, como el resto de estrellas, es un objeto esférico de gran tamaño formado principalmente por hidrógeno y helio. Su diámetro alcanza 1 400 000 km, o 109 veces el de la Tierra; pero su densidad es 4 veces menor que la de la Tierra. El Sol no está constituido por el gas brillante que vemos en nuestros telescopios. Tiene, al igual que la Tierra, diferentes capas a diferente temperatura. Cada capa tiene sus propias características que la hacen especial. Debajo podemos encontrar una figura de la estructura del Sol donde se aprecian estas distintas capas.

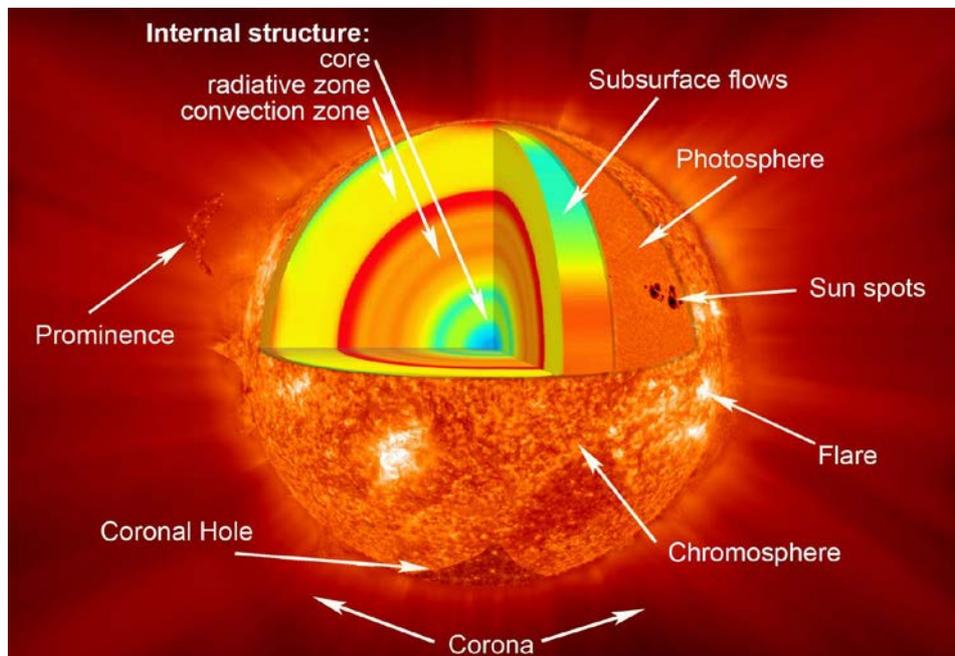


Figura 1: Un corte en el Sol. Las reacciones nucleares ocurren en el centro.

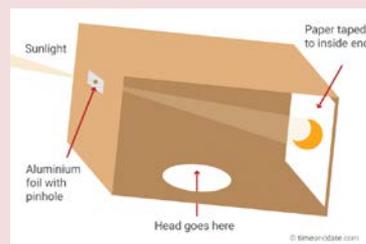
Créditos: NASA

Una breve descripción de estas capas mostradas Figura 1 sería:

- i. **El núcleo:** El núcleo del Sol es la fuente de toda su energía. La cantidad de energía producida es prácticamente constante, no se observa variación en su brillo ni en el calor emitido. Su temperatura es muy alta y el material del que está compuesto tiene una densidad muy elevada, debido a la presión tan extremadamente alta. Es la combinación de estas dos propiedades la que crea un ambiente idóneo para las reacciones nucleares. Estas reacciones nucleares siempre producen elementos pesados en la tabla periódica.
- ii. **La zona radiativa:** El transporte de energía del núcleo a las regiones adyacentes se realiza en forma de radiación. Así es como viajan los fotones desde el núcleo a las regiones externas, de ahí el nombre de *zona radiativa*. A través de esta área del interior del Sol la energía (en forma de radiación) se transmite por la interacción de las partículas entre sí. Algunos átomos son capaces de mantenerse intactos en esta zona, ya que aquí la temperatura no es tan alta como en el núcleo. Pero otras partículas son capaces de absorber energía, almacenarla por un corto período de tiempo, y emitirla en forma de radiación nuevamente. De esta forma la energía asciende de una fila de átomos a otra, hasta el final de esta capa.
- iii. **La zona convectiva:** La energía que se ha generado en un principio en el núcleo necesita un nuevo método de transporte para atravesar la superficie del Sol. Esto es necesario ya que la temperatura disminuya drásticamente una vez abandonada la zona radiativa (de 5 millones de grados Kelvin a 2 millones). Los átomos absorberán energía más fácilmente a esta temperatura, pero no la emitirán tan rápidamente precisamente por el mismo motivo. Por tanto la energía transportada por radiación disminuye considerablemente. Los átomos se calientan absorbiendo la energía pero ascienden por la zona convectiva hasta la superficie, donde llevan este calor.

Hazlo en casa

Puedes construir tu propio observatorio en casa para ver un eclipse de una forma segura. Tan solo necesitas una caja de cartón con un pequeño agujero, a través del cual la luz del Sol pasará y podrás proyectarla dentro de la caja.



Para más información sobre cómo construir uno puedes visitar:
<https://www.timeanddate.com/eclipse/box-pinhole-projector.html>

- iv. **La fotosfera:** La fotosfera, o la superficie aparente del Sol, es la parte que observamos del Sol. Decimos aparente porque a diferencia de la Tierra el Sol está hecho de plasma (gas muy caliente) y no de un material sólido, por lo que no tiene una superficie como tal. Hay un punto en el sol a partir del cual el material es tan denso que no podemos ver a través de él. La fotosfera es el disco que vemos a través de un telescopio con filtro o si lo proyectamos, por ejemplo, en un papel.
- v. **La cromosfera:** La cromosfera es la capa inmediatamente superior a la fotosfera y tiene un grosor mayor. Su densidad muy baja, por lo que es prácticamente imposible observarla sin filtros de banda estrecha o durante eclipses totales, debido a su baja luminosidad en comparación con la fotosfera. Además es bastante menos densa que esta.

vi. **La corona:** Es la parte más grande y menos densa de todo el Sol. Está compuesta por el plasma que escapa de su interior y es capaz de alcanzarse un millón de grados Kelvin, pero su densidad es muchísimo menor que la de la cromosfera. Además, el viento solar transporta el material desde la corona al medio interplanetario. Desde la Tierra, la corona tan solo es visible durante los eclipses totales.

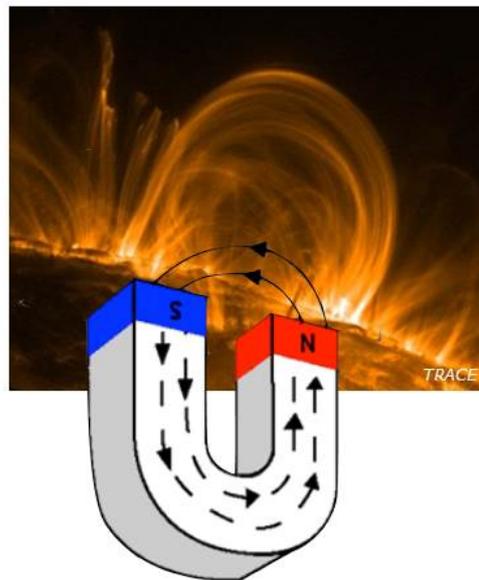
Tipo radiación	Temperatura	Grosor de la capa	Densidad
Fotosfera	8000 – 4500 K	500 km	$\sim 10^{-4}$ kg/ m ³
Cromosfera	4500 - 20000 K	1600 km	$\sim 10^{-8}$ kg/ m ³
Zona de transición	20000 – 10 ⁶ K	100 km	$\sim 10^{-10}$ kg/ m ³
Corona	10 ⁶ - 3x10 ⁶ K	>10 ⁷ km	$\sim 10^{-13}$ kg/ m ³

Tabla 1: Temperatura y densidad de cada capa del Sol Créditos: (CESAR)

Como hemos visto, ni su temperatura ni su densidad es la misma, por tanto su actividad también será diferente:

1. **Manchas solares:** Cuando miramos al Sol a través de un telescopio adaptado (o por proyección), hay veces que pueden verse puntos oscuros. Estas zonas , en constante cambio, se llaman manchas solares y se encuentran en la fotosfera. Las vemos oscuras porque su temperatura no es la misma que la del gas de su alrededor. Esta temperatura varía de 3000 a 4500 K, mientras que en el resto de la fotosfera la temperatura es normalmente de unos 5780 K. Una gran cantidad de líneas de campo magnético entran y salen a través de ellas. Normalmente aparecen en parejas o en grupos, y en su mayor parte lo hacen en el Norte o en el Sur del ecuador el Sol.

Active regions



ESA UNCLASSIFIED - For Official Use

Solar Eclipse 2017 | Slide 16



European Space Agency



Figura 2: Líneas de campo magnético visualizadas (Créditos: CESAR)

2. **Las llamaradas:** No solo las manchas nos indican la cantidad de actividad del Sol, las llamaradas solares también son un claro indicativo de ella. El Sol normalmente expulsa material desde la cromosfera y la corona. Este material contiene una gran cantidad de energía que es emitida por el Sol de esta forma. Desde la Tierra las llamaradas son vistas como un *flash* de luz en el que aumenta el brillo de una región determinada del Sol. A veces, estas llamaradas son tan intensas que el material eyectado (típicamente electrones y átomos de hidrógeno) escapan del campo gravitacional del Sol y pueden viajar libremente por el sistema Solar.



*Figura 3: "Lluvia coronal" en el Sol – material eyectado por una llamarada – cayendo de nuevo al Sol.
La Tierra a escala (Créditos: NASA)*

3. **Las prominencias:** También se las conoce como filamentos y se forman en la corona. Una prominencia solar es una enorme estructura de gas a altísima temperatura que es arrastrada por las líneas de campo magnético sobre la superficie del Sol. Normalmente se observan con una forma alargada y entrelazada.
4. **Eyecciones de masa coronal (CMEs):** Suele ocurrir que las líneas de campo magnético se entrelacen entre sí mientras en ellas hay una prominencia, y suele ocurrir de manera repentina y muy rápida. Si esto ocurre el material de la prominencia será eyectado por el Sol, alcanzado unas velocidades de unos 1 000 km/s. Se conocen como eyecciones de masa coronal. A veces ocurren a la vez que las llamaradas, pero mientras que las primeras solo emiten luz estas segundas emiten materia. Suelen durar varias horas, hasta que las líneas de campo se retuercen lo suficiente y se rompen. Estas eyecciones son capaces de eyectar grandes cantidades de materia y de energía electromagnética. Cuando esto ocurre, y si van en la dirección de la Tierra, en 2-5 días un intenso flujo de partículas alcanzará la Tierra. Las eyecciones de masa coronal también portan energía magnética, que interactuará con el campo magnético de la Tierra causando las auroras boreales y otros efectos.

Todos estos fenómenos mencionados están muy relacionados con el ciclo solar.

Ciclo Solar

Los astrónomos han observado que el ciclo de las manchas solares está íntimamente relacionado con la actividad del Sol, incluyendo poderosas eyecciones de masa coronal, el tamaño y extensión de las capas más externas del Sol (la corona) y la intensidad de luz emitida por las partículas que el Sol emite por todo el espacio, especialmente al sistema solar. Estas partículas pueden por tanto afectar a los campos magnéticos de numerosos planetas del sistema, sobre todo a la Tierra. Las Auroras Boreales son un ejemplo muy representativo de este fenómeno.

Como se ha mencionado previamente el Sol tiene ciclos y ahora mismo se encuentra en el ciclo 24, que comenzó en Enero de 2008. Decimos que es el número 24 porque el primer ciclo fue descubierto en el año 1755. Y desde entonces se han reconocido 24 ciclos en total.

Se emplean varios métodos para predecir la actividad del Sol (el número de manchas en concreto). Normalmente, cuando ha comenzado un nuevo ciclo el comportamiento y cantidad de manchas no es tan difícil de prever. Hathaway y su equipo han realizado predicciones a 3 años vista, y se ha confirmado que son las más precisas hasta la fecha.

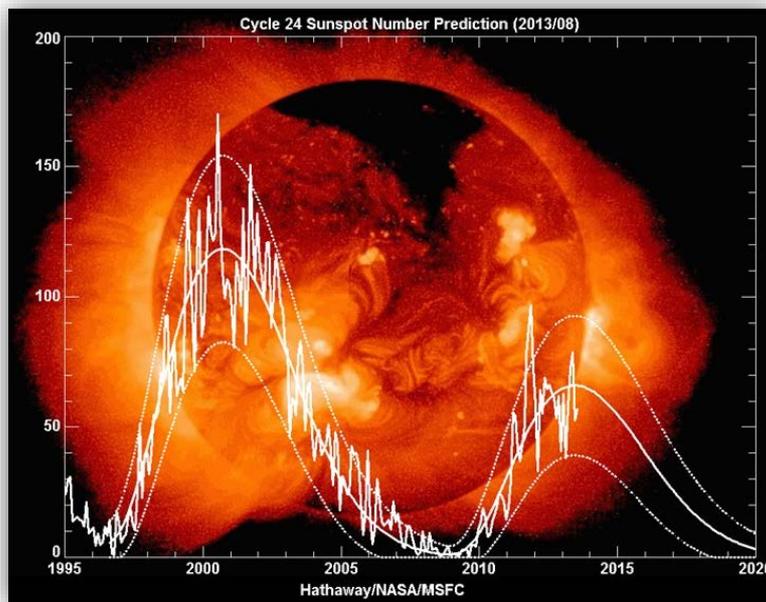


Figura 4: El ciclo solar, 1995-2015. La curva "picuda" indica el número de manchas solares observadas; las curvas más suaves son predicciones (Créditos: D. Hathaway/NASA/MSF)

Los métodos para pronosticar la actividad solar se han desarrollado para momentos cercanos (antes y después) de mínimos en el número de manchas, y muestran la relación entre ellas con la actividad, con la duración de ciclos anteriores; y todas ellas con los ciclos futuros. Investigar y construir estos modelos ha permitido modelizar el Sol hasta obtener predicciones fiables de los próximos ciclos de actividad.

Se han confirmado y contrastado cambios en el campo electromagnético de la Tierra (producidos por tormentas solares) con la actividad solar. Existe por tanto una relación entre el campo magnético de la Tierra, las manchas solares y las consecuentes tormentas solares; pero la relación exacta aún se desconoce. Pueden emplearse métodos de estudios geomagnéticos en los que se miden variaciones del campo magnético de la Tierra y la actividad solar para predecir también la cantidad de manchas en la superficie del Sol.

¿Cómo estudian el Sol los astrónomos?

Los astrónomos estudian el Sol de varias maneras, diferentes entre sí, pero que se complementan las unas a las otras: emplean telescopios en Tierra y telescopios en satélites. Cada capa del Sol es diferente, por lo que requerirá también un instrumento diferente para su observación. Como se estudian en todo el espectro electromagnético, los científicos obtienen toda la información posible de ellas.

Como ya sabemos, las diferentes capas de las cuales pueden obtener información son:

- Interior Solar
- Fotosfera
- Cromosfera
- Corona

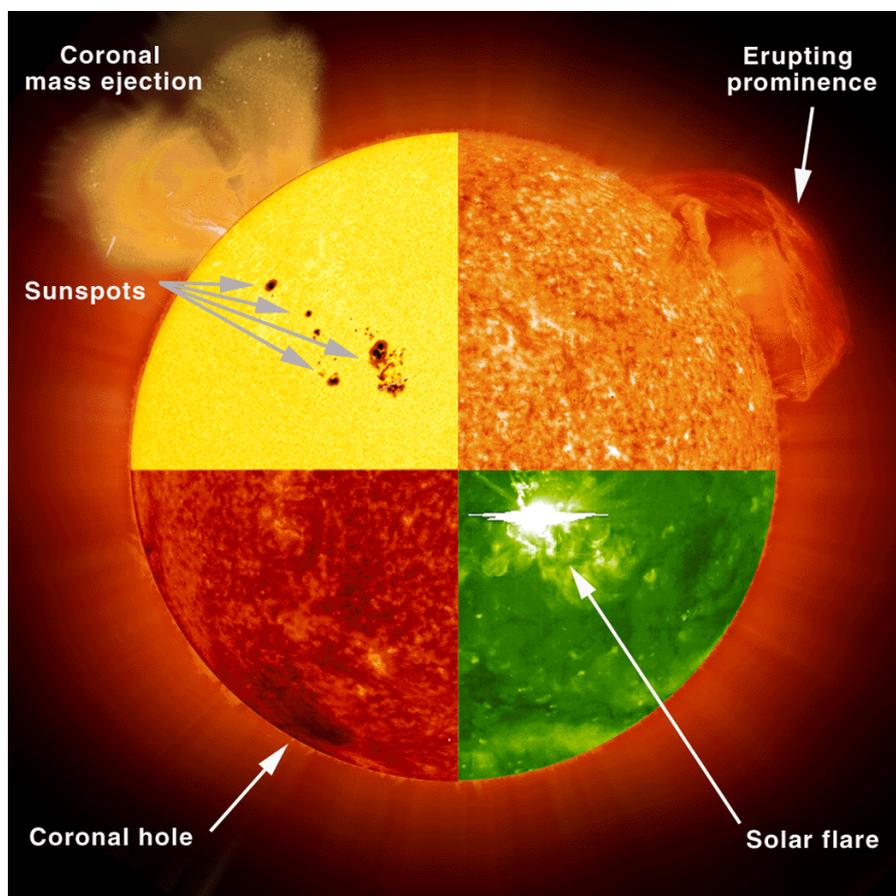


Figura5: Diferentes vistas del Sol

Créditos: SOHO (NASA/ESA)

1. Interior Solar

El núcleo del Sol es su parte más densa. Es tan densa que los fotones tardan más de 2 000 años en atravesarla, siguiendo lo que se conoce como “*random walk*” (camino aleatorio). Los científicos hacen uso de la heliosismología para estudiar esta parte del Sol, al igual que en la Tierra estudiamos el interior terrestre para comprender los terremotos.

Casi toda la información disponible del núcleo del Sol se ha obtenido con el satélite SOHO (ESA/NASA), en particular con el instrumento GOLF (Global Oscillations at Low Frequencies) instrument.

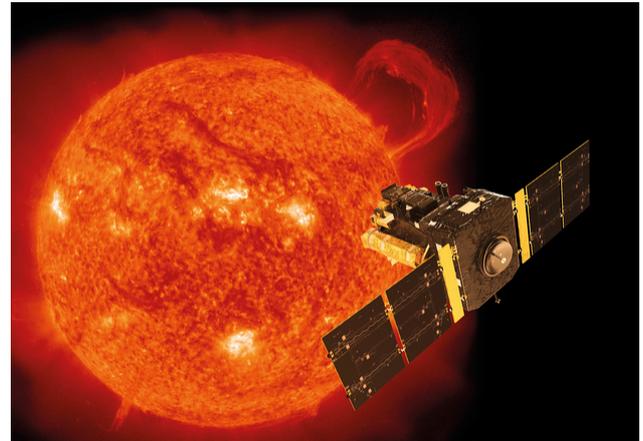


Figura 6: Impresión artística de SOHO.
(Créditos: ESA/ATG medialab)

2. Fotosfera

A menudo se hace referencia a la fotosfera como a la superficie del Sol, ya que fue la primera parte que los científicos comenzaron a estudiar primero, ya que es lo que vemos a simple vista. **(AVISO: UTILIZA SIEMPRE PROTECCIÓN EN TUS OJOS CUANDO MIRES AL SOL)**. Todo lo que ocurre en esta capa es responsable de lo que ocurrirá posteriormente en la atmósfera solar, por lo que es de vital importancia estudiar la fotosfera con atención.

ESA también estudia esta capa del Sol con SOHO, pero empleando otros instrumentos: MDI (Michelson Doppler Imager) y VIRGO (Variability of Solar IRradiance and Gravity Oscillations) son los encargados de estudiar la fotosfera.

Hay muchos telescopios en tierra apuntando al Sol para estudiar la fotosfera también. Por ejemplo, ESA utiliza además el Observatorio HELIOS, ubicado en ESAC (Madrid, España) y operado por CESAR.

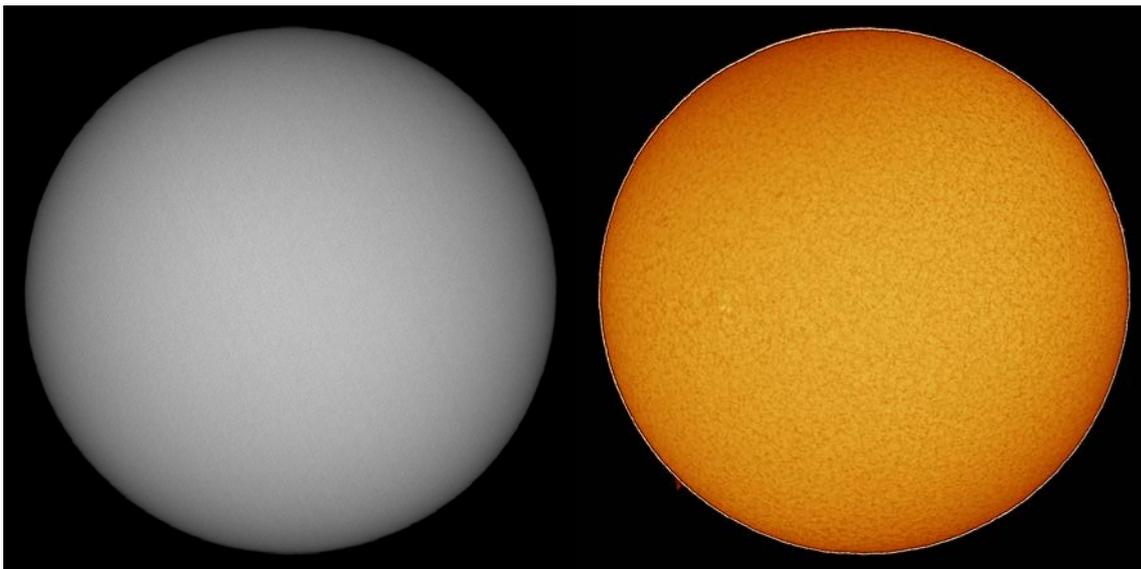


Figura 7: Fotografías del Sol tomadas por CESAR y procesadas por Abel de Burgos (ESA/CESAR). La imagen de la izquierda muestra la fotosfera, mientras que la imagen de la derecha muestra la cromosfera, con un tono más anaranjado.

3. Cromosfera

La cromosfera comienza en el punto más frío por encima del Sol, a unos 4 000 K, pero termina a una temperatura mayor, unos 8 000 K. Por tanto, se emitirá luz de diferentes longitudes de onda, y será necesario emplear filtros especiales para cada una de ellas. El filtro más característico utilizado es el H-alfa, que es la emisión principal del hidrógeno y es de color rojo. Los Físicos Solares necesitan instrumentos capaces de detectar la luz ultravioleta que se emite a mayores temperaturas, afortunadamente SOHO lleva también el instrumento EIT, que estudia en el UV.

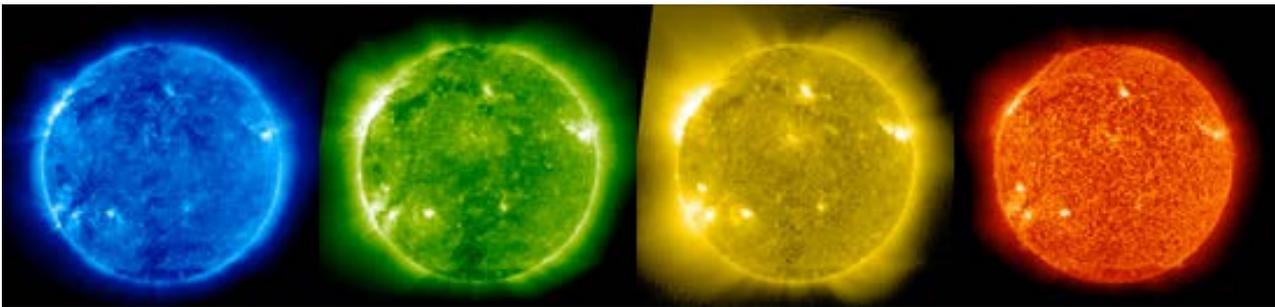


Figura8: EIT images show the Sun's corona in 4 different wavelengths of ultraviolet light (Créditoss: ESA/NASA)

4. Corona

Para observar esta última capa es necesario emplear instrumentos sensibles a rayos UV y a Rayos-X. La corona del Sol puede ser observada con luz visible también, solo es un millón de veces más tenue que la fotosfera (¡unas 1 000 veces más tenue que el brillo de nuestro cielo!). Por este motivo, para estudiarlo en luz visible, es necesario tapar toda la luz emitida por la superficie. Los eclipses solares son por tanto la ocasión ideal para estudiar esta capa, ya que cuando la Luna tapa la fotosfera hace que el cielo se oscurezca y podamos observar adecuadamente. Sin embargo, nosotros mismos, también podemos bloquearla utilizando un coronógrafo.

Nuevamente SOHO dispone de EIT, CDS, UVCS y LASCO para estudiar la corona, ¡proporcionando imágenes con mucha información y con un increíble atractivo visual!

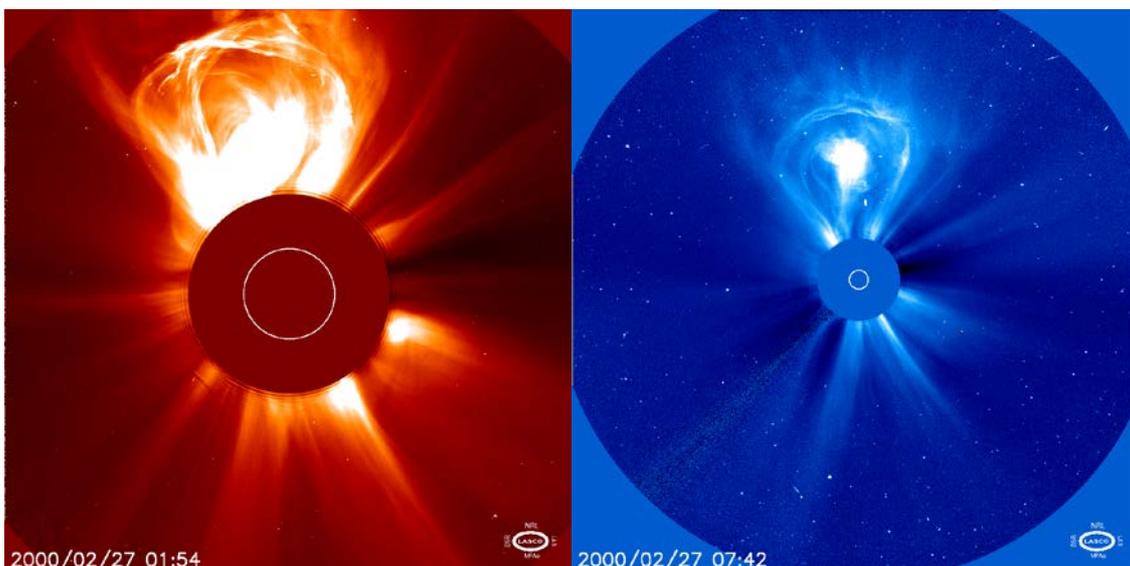


Figura 9: Diferentes imágenes de una eyección de masa coronal tomada por LASCO. Créditos: NASA/ESA