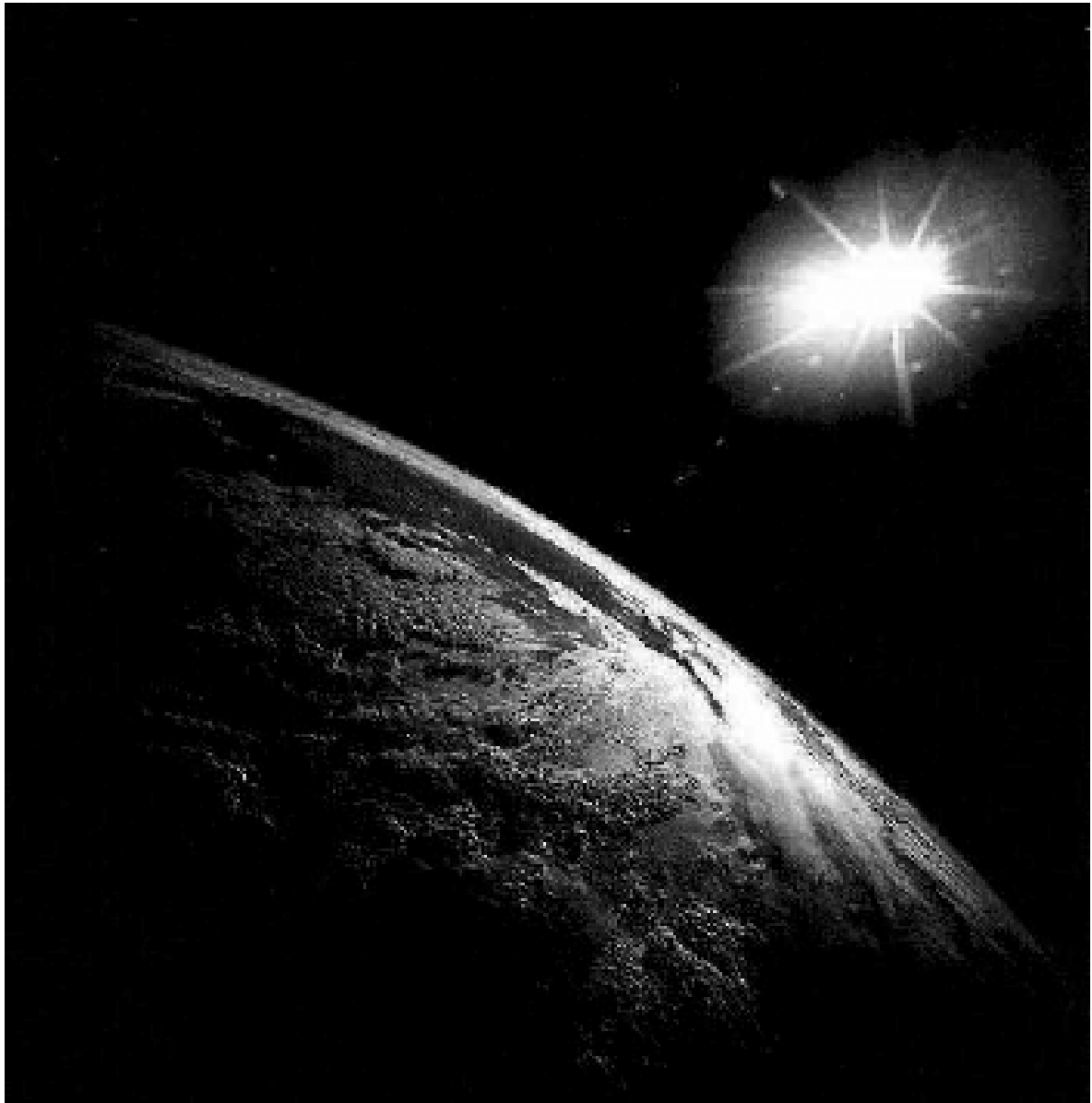




Estableciendo conexiones Sol-Tierra



Información básica

Traducción y adaptación: *Dra. Inés Rodríguez Hidalgo*
(Instituto de Astrofísica de Canarias,
Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna).

Información básica sobre la conexión Sol-Tierra

Estableciendo conexiones Sol-Tierra:

Índice de contenidos:

(los comentarios van asociados a las transparencias de la charla para el tercer nivel).

1. Introducción.....	3
2. Áreas de trabajo principales.....	3
3. Importancia de la Tecnología Espacial.....	4
4. Estructura interna del Sol.....	5
5. Superficie y atmósfera del Sol.....	7
6. Manchas solares.....	8
7. Fulguraciones.....	10
8. Expulsiones de masa coronal.....	11
9. El ciclo solar.....	11
10. Viento solar.....	12
11. Naves solares — Exploración inter-espacial.....	13
12. Magnetosfera de la Tierra.....	14
13. Expulsiones coronales de masa: cruzando el camino de la Tierra.....	15
14. Expulsiones coronales de masa: su impacto en la Tierra.....	16
15. Auroras polares: puntos de vista.....	16
16. Auroras polares: luces en movimiento.....	17
17. Medioambiente espacial: efectos sobre satélites en órbita.....	17
18. Medioambiente espacial: efectos sobre sensores de satélites.....	18
19. Tormentas solares: efectos sobre los humanos en el espacio.....	18
20. Tormentas solares: efectos sobre sistemas sociales.....	19
21. Energía procedente del Sol: efecto sobre el clima terrestre.....	20
22. Conexión Sol-Tierra.....	21

Transparencia 1 Introducción

A simple vista el Sol no parece cambiar. Sin embargo, hoy día se están haciendo muchos interesantes descubrimientos gracias al uso de satélites con instrumentos capaces de detectar la radiación solar en muchas frecuencias diferentes del espectro solar (algunas no visibles desde la Tierra), y de potentes ordenadores para analizar los datos. Ahora sabemos que *el Sol SÍ cambia, y de forma importante*. Por ejemplo, las tormentas en el Sol son miles de veces mayores que las terrestres y más poderosas que miles de millones de bombas atómicas. Entre las tareas de NASA y ESA está la de estudiar el Sol, para lo que tienen actualmente numerosas misiones en operación y desarrollo.

Transparencia 2 Principales áreas de investigación Ciencia y Tecnología del Espacio

El satélite **Ulysses** fue lanzado por el Space Shuttle (Lanzadera Espacial) **Discovery** el 6 de octubre de 1990, con la misión de estudiar el viento solar. Para ello requería velocidades que no habían sido alcanzadas nunca antes. Pronto se diseñarán otros satélites para estudiar la *heliopausa* (ver su definición en la transparencia 5), que viajarán 10 veces más lejos que lo que ningún vehículo espacial ha viajado. Una de estas misiones, **Solar Probe** (Sonda Solar) será lanzada en 2007 y se acercará hasta unos 2 millones de kilómetros del Sol (unas 3 veces el radio solar). Como resultado de estos estudios del Sol, vamos consiguiendo también una mejor comprensión de otras estrellas del Universo.

La exploración humana y desarrollo en el Espacio dependen de tres factores principales: la capacidad para alcanzar el destino deseado, la de llevar a cabo las tareas requeridas... y la de volver, claro. Una comprensión completa de los procesos que tienen lugar en el Sol reducirá el riesgo para los humanos y aumentará las probabilidades de éxito de este tipo de misiones.

Ciencia de la Tierra: *virtualmente todas las fuentes de energía en la Tierra son resultado de la interacción Sol-Tierra*. Esta interacción también afecta a los sistemas del clima, incluyendo los ciclos del nitrógeno, del agua y del carbono.

Transparencia 3

Importancia de la Tecnología Espacial

La Ciencia estimula el desarrollo de la Tecnología utilizada para estudiar el sistema Sol-Tierra. Se han diseñado varios instrumentos para viajar a bordo de satélites que permiten estudiar el interior del Sol (de forma indirecta, ya que no es observable), su superficie y corona, el viento solar y la magnetosfera terrestre.

- Los satélites transportan *espectrómetros* que observan en longitudes de onda que van desde el visible al ultravioleta extremo.
- Los físicos del espacio dependen de los datos proporcionados por telescopios que detectan luz visible, luz ultravioleta, rayos X y rayos gamma.
- Se usan *detectores de partículas* para contar las del viento solar, magnetómetros para registrar cambios en los campos magnéticos, y cámaras para observar los patrones de comportamiento de las auroras.
- El instrumento llamado *Michelson Doppler Imager* (MDI, es un interferómetro de Michelson que hace uso del efecto Doppler para determinar velocidades en el Sol) proporciona mapas del campo magnético solar para tener un registro completo de la emergencia y distribución de las estructuras magnéticas en la fotosfera.
- Se necesitan *receptores y transmisores de radio* para detectar ondas de choque creadas por las expulsiones de masa coronal y el viento solar.

Transparencia 4

Estructura interna del Sol

La estructura del Sol es un sistema muy complejo: todavía hoy los científicos no comprenden bien todos sus procesos. Sin embargo, hay una serie de hechos sobre el Sol, basados en los actuales datos y medidas, que son aceptados universalmente y se presentan en la siguiente lista:

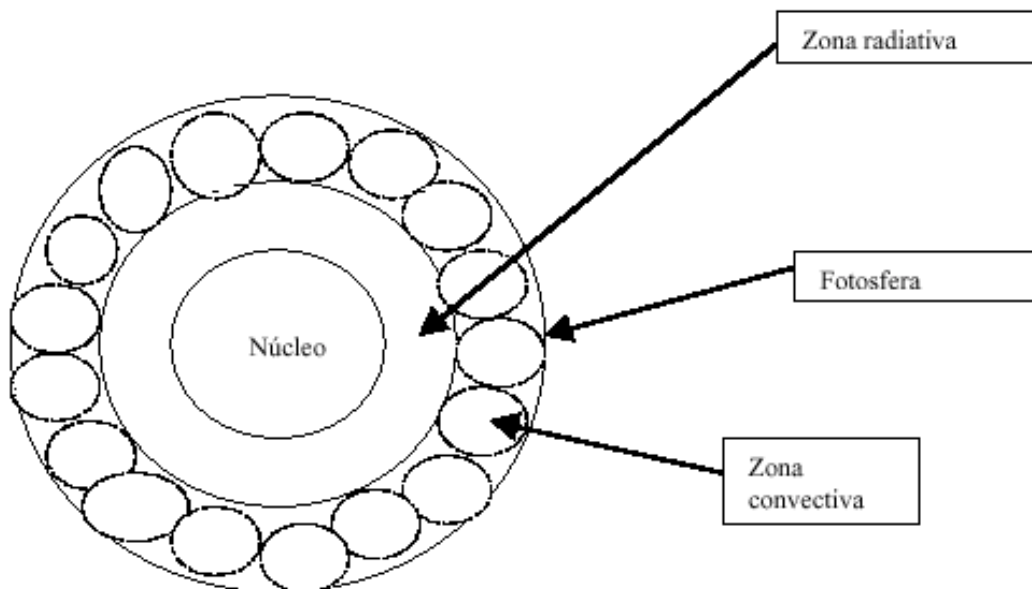
- La composición del Sol (en masa) en su zona superficial es de aproximadamente un 73% de hidrógeno y un 25% de helio. Hay muchos otros elementos químicos, pero constituyen menos del 2%.
- La masa del Sol es 332831 veces la de la Tierra.
- El Sol emite grandes cantidades de energía. Su luminosidad (potencia) es de 383 trillones de megawatios.
- La fuente de energía del Sol es la transformación de átomos de hidrógeno en helio mediante reacciones nucleares de fusión.
- El Sol emite energía en todas las longitudes de onda del espectro electromagnético, desde las ondas de radio a los rayos X y gamma.
- Se considera al Sol como formado por diferentes regiones:

su centro, el **núcleo**, tiene una temperatura aproximada de 15 millones de grados. Su energía es el resultado de los procesos de fusión nuclear que, a partir de núcleos de hidrógeno (recordemos que a esas temperaturas la materia se encuentra ionizada, con los núcleos atómicos y los electrones separados), producen núcleos de helio a través de una cadena de reacciones. El núcleo solar radia energía electromagnética en varias longitudes de onda, principalmente *rayos gamma*. Los fotones liberados por el núcleo tardan mucho tiempo (se estima en cientos de miles de años) en alcanzar la superficie del Sol. Hay pocas medidas sobre el núcleo del Sol y la mayor parte de nuestro conocimiento del mismo procede de inferencias e información secundaria.

La **zona radiativa** rodea el núcleo. Es demasiado fría como para que en ella se produzcan reacciones de fusión y demasiado

caliente como para que surja la convección. La energía es transportada en esta zona mediante ondas electromagnéticas o, equivalentemente, *fotones*, que interactúan continuamente con la materia.

La región que rodea a la zona radiativa se conoce como **zona convectiva**. Hay partes de esta zona que rotan mucho más rápido que otras, y en ella se dan interacciones turbulentas e inusuales del plasma. Hay chorros y corrientes que se mueven horizontalmente respecto al flujo general de energía hacia el exterior. Gracias al uso del MDI, los científicos han podido determinar el ritmo y dirección de los movimientos del plasma, así como la temperatura y rotación del Sol en varias zonas sobre y bajo su superficie, midiendo cómo vibran las capas superficiales del Sol.



- *Las dos pequeñas imágenes que aparecen en la parte inferior de la transparencia representan datos de MDI sobre la temperatura y rotación del Sol.*
- *La de la derecha muestra la temperatura, donde azul significa más frío y rojo, más caliente. También se ve hasta dónde han penetrado las celdas convectivas.*
- *La de la izquierda muestra la rotación, indicando en rojo las zonas que rotan más deprisa y en verde las que rotan más lentamente.*
- *Parece claro que el Sol es bastante complicado...*

Como era de esperar, la temperatura decrece desde el núcleo del Sol hasta la **fotosfera**, su superficie visible, a unos 5800 grados. Sin embargo, hay una enorme diferencia de temperatura entre la fotosfera y la **corona** (la parte más externa de la atmósfera solar), que puede alcanzar los 2 millones de grados. Todavía no se conoce bien la causa de este calentamiento, pero este hecho solo implica que aún queda mucho por saber acerca del Sol.

Transparencia 5 **Superficie y atmósfera del Sol**

A continuación hay una lista de las regiones que constituyen la atmósfera del Sol, y algunas de sus estructuras, con información más detallada:

Fotosfera: es la superficie visible del Sol.

- Es el límite en el que el Sol pasa de ser opaco (zona interior) a ser transparente (zona exterior) a la luz visible, que puede escapar desde esta capa. Aunque hay todavía una gran cantidad de gas y plasma sobre la fotosfera, se la suele considerar como la superficie del Sol. La fotosfera emite luz principalmente en el rango visible, pero también en otras longitudes de onda como el ultravioleta. El ozono de la atmósfera terrestre nos protege de esta radiación UV, muy energética, que puede llegar a causar cáncer de piel.

Cromosfera: es una zona intermedia entre la fotosfera y la corona.

- Está más caliente que la fotosfera, pero más fría que la corona.

Corona: es una capa de la atmósfera del Sol donde los átomos individuales de gas neutro y las partículas cargadas del plasma pueden viajar largas distancias sin sufrir colisiones, porque la densidad es extremadamente baja.

- Las moléculas y demás partículas se pueden mover casi libremente sin “rebotar” en otras partículas y átomos. La temperatura de la corona es aproximadamente de 1 millón de grados centígrados. La corona emite luz muy intensamente en las regiones UV y de rayos X del espectro electromagnético.

Heliosfera: es un amplio espacio alrededor del Sol que incluye todas las áreas donde la densidad del viento solar excede la del medio interestelar.

- Se extiende más allá de Plutón; la nave Voyager está actualmente empezando a ver sus límites más externos. Algunos científicos consideran que esta frontera es el verdadero límite exterior del Sol, aunque la mayoría de este espacio está, a todos los efectos y propósitos, prácticamente vacío. El límite de la heliosfera se denomina **heliopausa** y es la zona en que la presión del viento solar se equilibra con la del medio interestelar.

Mancha solar: es un área más fría (que se ve más oscura) de la fotosfera del Sol, asociada con una intensa concentración de campo magnético.

- Las manchas corresponden a zonas más calientes de la cromosfera sobre ellas, en las que el campo magnético calienta el gas. Incluso las regiones de la corona que están sobre manchas tienden a estar más calientes.

Agujero coronal: un área de la corona que es más fría (y se ve más oscura) que el resto.

- Generalmente se encuentran cerca de los polos del Sol y emiten menos radiación en las frecuencias del UV y rayos X. Las líneas de campo magnético que parten de los agujeros coronales se extienden hasta muy lejos en la heliosfera, de modo que los gases calientes de la corona pueden escapar fácilmente desde estas zonas hacia el espacio.

Protuberancia: una densa concentración de plasma (con forma de bucle, chorro, uno o varios arcos...) que se separa de la fotosfera y se extienden introduciéndose en la corona.

- Las protuberancias también reciben el nombre de **filamentos** dependiendo de la perspectiva del observador: si se ven en el borde del Sol, brillantes, se llaman protuberancias; sobre el disco solar aparecen oscuras y se llaman filamentos.

Transparencia 6

Las manchas solares

Las *manchas solares* son áreas frías que aparecen oscuras sobre la fotosfera. Realmente las manchas emiten luz, pero son más frías que su entorno y por eso se ven como zonas oscuras de la superficie del Sol.

Cuando se observan a lo largo de un periodo de tiempo corto, la aparición y posición de las manchas puede parecer aleatoria; pero más de un siglo de cuidadosas observaciones ha mostrado que la actividad solar tiene un comportamiento cíclico. *Aproximadamente cada 11 años la actividad magnética del Sol varía cíclicamente entre épocas llamadas de máximo y mínimo solar.* Durante el máximo hay más manchas que durante el mínimo. Las manchas solares se forman cerca del ecuador en la fase de máximo y más cerca de los polos en la de mínimo. Otras estructuras como las fulguraciones solares, expulsiones de masa coronal (CMEs, de las siglas de su nombre en inglés, Coronal Mass Ejections) y protuberancias también muestran un notable incremento en su número en las épocas de máximo.

Las zonas brillantes alrededor de las manchas, bastante mayores que éstas, reciben el nombre de *plages* (un término que no se suele traducir). En ellas la energía que fluye desde las capas más profundas del Sol es bloqueada temporalmente por la presencia de las manchas. Las “plages” brillantes no son tan fácilmente visibles como las manchas oscuras; cerca del borde de la fotosfera, que se ve algo más oscuro que el centro del disco solar, las “plages” se observan mejor. Durante el máximo solar hay muchas manchas oscuras, pero realmente el Sol emite entonces ligeramente más energía que en el mínimo, desde las “plages” que rodean a las manchas.

Se cree que tanto las manchas como las otras manifestaciones de la actividad solar son el resultado del campo magnético solar que se retuerce y anuda a medida que es enroscado alrededor del Sol por su *rotación*. Porque esta rotación es más rápida cerca del ecuador solar que cerca de los polos, lo que produce un estiramiento del campo magnético que termina retorciéndose. Como resultado se produce la *reconexión* de líneas de campo magnético y durante el máximo el Sol puede presentar varios polos norte magnéticos y el mismo número de polos sur.

- *La imagen superior izquierda muestra cómo las líneas de campo magnético se retuercen y anudan como resultado de la velocidad de rotación diferencial del Sol.*
- *La imagen superior del centro muestra una mancha solar apareciendo en la fotosfera.*
- *La imagen superior derecha es una imagen por ordenador de una mancha obtenida con la técnica de Michelson Doppler Imaging (MDI). Nótese que la influencia de las manchas solares en el material que las rodea se extiende hasta 20000 kilómetros o más bajo la superficie del Sol.*
- *La gráfica inferior son 150 años de actividad solar que muestran claramente el patrón cíclico de aparición de manchas, con sus épocas de máximo solar y mínimo solar.*

Transparencia 7

Fulguraciones solares

Las *fulguraciones solares*, al contrario que las manchas, aparecen como zonas brillantes de la fotosfera. Regiones activas son áreas que conectan intensos campos magnéticos. Se cree que las fulguraciones se forman cuando se libera súbitamente la energía magnética “fabricada” y almacenada en la atmósfera del Sol. La generación de esta energía es debida al retorcimiento, reconexión y formación de lazos de campo magnético. De forma similar a bandas elásticas retorcidas que se sueltan, estos lazos pueden romperse liberando energía. El plasma es expulsado como ráfagas de partículas hacia el espacio, eventualmente hacia la Tierra. La radiación emitida comprende todo el espectro electromagnético, desde las ondas de radio a los rayos gamma. Además, la energía magnética calienta y acelera partículas de la atmósfera solar, incluyendo electrones, protones y núcleos más pesados.

Una fulguración solar se desarrolla en tres fases:

- **Etapa precursora:** se dispara energía magnética que se detecta en forma de emisiones de rayos X blandos (los de mayor longitud de onda o menor frecuencia y, por tanto, menos energéticos, de los rayos X).
- **Etapa impulsora:** se aceleran los protones y se emiten ondas de radio, rayos X duros (más energéticos que los blandos) y rayos gamma (aún de mayor energía que los rayos X duros).
- **Etapa de decadencia:** se emiten de nuevo rayos X blandos.

Las fulguraciones se extienden hacia afuera, hasta la corona, y pueden alcanzar temperaturas entre 10 y 20 millones de grados. La energía liberada es equivalente a 10 millones de erupciones volcánicas, millones de veces más potente que el mayor terremoto. Una fulguración de tamaño promedio libera energía suficiente como para proporcionar la potencia consumida en Estados Unidos durante 10000 años. Las erupciones duran desde unos pocos minutos hasta horas, y pueden disparar reacciones de fisión y fusión nuclear durante cortos periodos de tiempo, fuera del núcleo del Sol.

Transparencia 8 ***Expulsiones de masa coronal***

Mientras que las fulguraciones solares se caracterizan sobre todo por la emisión de energía electromagnética y tienen escaso efecto sobre el campo magnético del Sol, las *expulsiones de masa coronal* (CMEs), que contienen partículas del plasma, pueden producir incluso efectos medibles sobre la Tierra. El plasma de la corona se organiza en estructuras llamadas *chorros* o *penachos* (como los de los cascos antiguos). Esta estructuración es causada por la fuerza que ejerce el campo magnético solar. Como las fulguraciones tienen lugar en zonas profundas de la cromosfera, tienen relativamente poco efecto sobre estos chorros o el campo que contienen. Una cantidad significativa de su energía rebota, de hecho, hacia regiones más interiores del Sol en forma de *ondas de presión*.

Transparencia 9 ***El ciclo solar***

El verdadero ciclo magnético del Sol es de 22 años, el doble que el ciclo de 11: con ese periodo el campo magnético solar invierte su polaridad. Además de la actividad de manchas, al aproximarse al máximo se produce un incremento de las fulguraciones, protuberancias y CMEs, y un retorcimiento de las líneas de campo magnético del Sol.

La *Heliosismología*, una rama de la Física Solar en continuo avance, estudia las vibraciones u oscilaciones del Sol (que son

como “solemotos”) utilizando técnicas similares a las que los geofísicos usan para estudiar los terremotos en nuestro planeta. Los análisis heliosismológicos proporcionan un conocimiento muy valioso del interior del Sol, que no es accesible a la observación directa. Algunas vibraciones solares son consecuencia de explosiones masivas en la superficie del Sol, totalmente naturales, que llamamos *fulguraciones*. El análisis de estas oscilaciones ha mostrado que existen zonas del Sol en las que el plasma rota a diferentes velocidades. Se cree que es el rápido movimiento del plasma a través de la frontera entre esas zonas el que genera el campo magnético solar (recordemos que las cargas eléctricas aceleradas producen campos magnéticos). Parece que los campos se forman justamente en el límite entre la circulación del plasma esencialmente por corrientes convectivas y la región más interior en la que no hay convección. El plasma asciende hasta la corona y los campos magnéticos emergentes emigran hacia los polos. Durante el ciclo de 11 años esto conduce a la neutralización e inversión del dipolo magnético global del Sol. Esta explicación está actualmente en revisión a medida que se van recibiendo más datos procedentes de telescopios a bordo de satélites que pueden observar en longitudes de onda más cortas que las del visible, como el ultravioleta extremo y los rayos X.

- *La imagen de la izquierda es una muestra de la actividad solar en el año 2000.*
- *La imagen superior derecha es una serie de imágenes de la corona en rayos X mostrando la progresión desde el mínimo solar. En ella se ve un notable incremento de la actividad.*
- *Las imágenes de la esquina inferior derecha muestran una comparación de la forma de la corona en el máximo solar y en el mínimo. En el máximo hay una mayor actividad en todas direcciones, mientras que en el mínimo la actividad aparece sobre todo en la zona ecuatorial del Sol.*

Transparencia 10

El viento solar

Las partículas cargadas que constituyen el *plasma* solar son “sopladas” desde el Sol a gran velocidad en todas direcciones. A este flujo de partículas se le llama *viento solar*. Cuando el viento solar alcanza la Tierra ya es muy poco denso, muy ténue: por comparación, las más bajas presiones que se pueden alcanzar en cámaras de vacío en Tierra son como 1 millón de veces mayores.

La suma total de la masa del viento solar es enorme. Una de sus consecuencias es la formación de una estructura llamada *sábana (o lámina) de corriente*. No es una estructura visible porque es demasiado difusa, pero es la estructura más coherente en la heliopausa. Está más o menos centrada en el Sol y se extiende hacia afuera hasta que alcanza una zona en que su densidad es la misma que la del medio interestelar, llamada *heliopausa*. No se han hecho medidas de este límite final, pero se extiende bastante más allá de la órbita de Plutón.

El viento solar transporta una cantidad sustancial de energía ya que las partículas que lo componen, individualmente, son muy energéticas. El viento solar expulsado desde los polos tiene una velocidad promedio de unos 800 kilómetros por segundo (2880000 km/h), mientras que el procedente de las zonas ecuatoriales tiene una velocidad promedio de unos 400 o 500 kilómetros por segundo. Estas partículas viajan en forma de nubes y contienen cantidades significativas de energía electromagnética. Son capaces de distorsionar la cavidad magnética de la Tierra (la *magnetosfera*), comprimiendo su zona diurna (la que mira al Sol) y expandiendo su zona nocturna en forma de cola.

- *Esta distorsión de la magnetosfera se puede ver en la imagen de la esquina inferior derecha.*

Transparencia 11

Nave solar - Exploración interestelar

La luz del Sol, compuesta de *fotones*, será utilizada dentro de los próximos 10 o 20 años para propulsar un vehículo interestelar más allá de nuestro Sistema Solar. Los científicos de NASA creen que tal nave podría ser lanzada utilizando la presión de la luz solar. Viajaría a 10 veces la velocidad de la lanzadera espacial en órbita, a unos 90 kilómetros por segundo (324000 km/h).

Una preocupación que existe a la hora de diseñar una *vela solar* es encontrar un material que sea fuerte, pero ligero, y que pueda ser desplegado en el espacio. Un candidato importante es un material de *fibra de carbono* cuya naturaleza en forma de red, de líneas cruzadas, lo hace muy fuerte y de densidad extremadamente baja.

El uso de carbono permitirá a la vela resistir el intenso calor del Sol. El material será probado bajo condiciones muy duras que simulen el entorno espacial. Además de la propulsión mediante fotones, los científicos e ingenieros están considerando la posibilidad de utilizar *láseres de gran potencia* o *transmisores de microondas*, para proporcionar al vehículo un empuje adicional: estos dispositivos estarían dirigidos hacia la vela durante unas pocas semanas para añadir su potencia a la propulsión de los fotones solares. Se estima que este método proporcionaría a la vela una aceleración 100 veces mayor que la de la gravedad terrestre, lo que supondría una velocidad de hasta 30000 kilómetros por segundo, 1 décima de la de la luz. El Programa Tecnológico para la Vela Solar planea lanzar un vuelo de demostración en el año 2005, seguido de la Sonda Interestelar en 2010. Este satélite es un vehículo propulsado por una vela y diseñado para viajar a través de nuestro Sistema Solar. La misión es el resultado del esfuerzo conjunto del Marshall Space Flight Center (Centro de Vuelo Espacial Marshall) y el Jet Propulsion Laboratory (Laboratorio de Propulsión a Chorro) de NASA. El desarrollo de la vela solar permitirá viajes espaciales que serían imposibles utilizando propulsión química.

Transparencia 12

La magnetosfera de la Tierra

- **Choque en forma de arco:** bordea la magnetosfera en su lado diurno y desvía parcialmente el viento solar. Causa una transición súbita del viento solar que lo hace más turbulento mediante cambios bruscos de su temperatura y densidad.
- **Magnetocola:** región alargada del campo magnético terrestre que se aleja de la Tierra, en el lado nocturno de la magnetosfera. Los cambios en la magnetocola producen brillantes *auroras* en las zonas polares terrestres.
- **Cúspide:** separa las líneas de campo magnético de polaridad norte a sur. Es un área de débil campo magnético que permite la entrada de partículas del viento solar en esa región, algunas de las cuales interactúan con la alta atmósfera de la Tierra.

- **Magnetopausa:** frontera donde se igualan la presión interior de la magnetosfera y la presión exterior del viento solar.
- **Cubierta magnética:** región de plasma muy turbulento entre el arco en forma de choque y la magnetopausa, que tiene un grosor de unas 2 veces el radio terrestre.
- **Cinturones de radiación de Van Allen Belts:** regiones en forma de “donut” que rodean la Tierra y contienen electrones e iones de alta energía atrapados en el campo magnético terrestre.

Transparencia 13 ***Expulsiones de masa coronal: cruzando el camino de la Tierra***

Cuando las regiones activas del Sol entran “en erupción”, debido a intensas fuerzas magnéticas no equilibradas en su superficie, transportan plasma desde la corona al espacio: son las *expulsiones de masa coronal (CMEs)*. Este plasma expulsado generalmente transporta consigo un prominente campo magnético de forma helicoidal en una enorme estructura llamada *nube magnética*.

- *Esta estructura de campo se muestra en la figura de la derecha.*

Las líneas helicoidales internas (en rojo) se parecen a muelles de un colchón extendidos. En verde se representan las líneas del campo magnético de la Tierra embebidas en la nube magnética en ese momento.

Las CMEs lanzan del orden de 1×10^{13} kilogramos de material hacia fuera del Sol. En la transparencia se muestra el tamaño de estas estructuras comparado con el de la Tierra. Las partículas liberadas desde el Sol se mueven en un grupo u onda y tienen su propio campo magnético. Este conjunto de partículas cargadas y muy energéticas moviéndose juntas produce diversos efectos a lo largo de su camino.

Transparencia 14

Expulsiones de masa coronal: impacto sobre la Tierra

Hay una fuerte interacción entre las CMEs y el campo magnético de la Tierra. Después de viajar durante 2 o 3 días desde el Sol, estas nubes de plasma literalmente colisionan con la magnetosfera y pueden comprimirla, aunque esto no ocurre durante todas las CMEs, sino sólo en aquéllas que transportan suficiente energía. La mayoría de las partículas cargadas son desviadas por la magnetosfera y viajan hacia regiones más allá de la Tierra.

Bajo ciertas condiciones la energía transportada por el viento solar puede penetrar en la magnetosfera. Entonces se convierte en energía electromagnética mediante una distorsión adicional de la cavidad magnética, que comprime su lado diurno y extiende su cola. Esta magnetosfera con mayor cantidad de energía se vuelve inestable y la energía almacenada en la larga magnetocola es liberada súbitamente. Parte de ella acelera a los electrones, a lo largo de las líneas de campo magnético, hacia la atmósfera terrestre donde finalmente producen las *auroras*.

Transparencia 15

Auroras: diferentes puntos de vista

La visibilidad de las auroras depende de varios factores: los mejores lugares para verlas son Alaska central, el centro de Canadá, Groenlandia y Escandinavia durante las últimas horas de la tarde. En raras ocasiones llegan a ser vistas en latitudes tan meridionales como las de Florida o Japón. Las auroras sólo se ven cuando suceden de noche porque ni siquiera cuando alcanzan su máxima intensidad son suficientemente brillantes como para poder ser vistas en el cielo diurno. Para que nuestros ojos puedan detectarlas debe haber un número suficiente de electrones que bombardeen la alta atmósfera y hagan que el oxígeno y el nitrógeno emitan una cantidad suficiente de fotones. También el clima debe cooperar, ya que si el cielo está nublado no será posible ver la aurora.

Las *Luces del Norte* que se ven típicamente desde la Tierra son causadas por colisiones entre los electrones que se mueven muy rápidamente y el oxígeno y nitrógeno de la atmósfera. Los electrones proporcionan energía a esos elementos, excitándolos.

Cuando vuelven a su estado normal emiten un fotón, una cantidad elemental de energía electromagnética, en forma de luz. El oxígeno emite tanto una luz verdosa-amarillenta (el color más familiar de las auroras) como luz rojiza, mientras que el nitrógeno generalmente emite luz de azulada.

Transparencia 16 ***Auroras: luces en movimiento***

Las áreas en forma de anillo que se ven en la transparencia se llaman *óvalos aurales*. Sólo pueden ser vistos desde el espacio. La forma de una aurora depende de la fuente de los electrones y de la magnetosfera, así como de los procesos que hacen a los electrones precipitarse en la atmósfera terrestre.

- *En esta imagen se usa falso color para representar la luz ultravioleta. Cuanto más brillante es el color, más intensa es la aurora. Este evento solar particular sucedió entre el 14 y el 16 de julio de 2000.*

Transparencia 17 ***Medioambiente espacial:*** ***efectos sobre naves en órbita***

Las naves espaciales en órbita son fácilmente dañadas por diversas manifestaciones del *medioambiente (o clima) espacial*, determinado esencialmente por el viento solar y las CMEs. Uno de sus más serios efectos es el arrastre atmosférico. Las órbitas de la mayoría de los satélites están en los límites más altos de la atmósfera terrestre. Cuando las tormentas del Sol bombardean la atmósfera con grandes cantidades de partículas energéticas, ésta sufre una expansión. Se hace mayor la densidad de los gases alrededor de los satélites en órbita, produciendo un arrastre que puede empujarles fuera de sus trayectorias. Los satélites que quedan desorientados pueden no ser capaces de seguir realizando algunas de las tareas para las que fueron diseñados, con lo que sus misiones se ven acortadas por este fenómeno.

Transparencia 18
Medioambiente espacial:
efectos sobre sensores a bordo de satélites

Algunos *sensores* a bordo de satélites, como las *cámaras CCD* (similares a las de los vídeos domésticos) son dispositivos eléctricos delicados. Las partículas de alta velocidad procedentes del Sol pueden penetrar en ellos y causar su mal funcionamiento, o estropear la información que están proporcionando a los científicos. Algunas de estas partículas tienen energía suficiente como para atravesar el aislamiento de estos detectores y pueden causar serios problemas si hacen aumentar la carga eléctrica. Muchos de los sistemas en satélites que controlan sus paneles solares, apuntado y comunicaciones con la Tierra, pueden dejar de funcionar adecuadamente por este motivo.

- *En la imagen se observan puntitos brillantes, que son partículas cargadas del viento solar que han golpeado la lente del instrumento a bordo del satélite.*

Transparencia 19
Tormentas solares:
efecto sobre los humanos en el espacio

Si los vuelos espaciales llegan a ser rutinarios, *debemos encontrar alguna forma de predecir los fenómenos del medioambiente espacial*. Las partículas energéticas liberadas por el Sol durante sus tormentas pueden dañar tejidos sensibles del cuerpo humano, causando heridas similares a quemaduras. Las retinas de los ojos son particularmente sensibles.

Un astronauta en el espacio durante una tormenta solar puede estar expuesto a dosis de radiación que son miles de veces mayores que la radiación que recibe normalmente. Esta exposición a la radiación puede tener efectos a largo plazo en la salud, que incluyen deterioro de los cromosomas, debilitamiento del sistema inmunológico e incluso, posiblemente, cáncer.

Las partículas cargadas positivas de alta energía que emanan del Sol pueden suponer una seria amenaza por su masa y energía relativamente altas: pueden causar severos daños en los tejidos.

Transparencia 20 ***Tormentas solares:*** ***efectos sobre sistemas sociales***

Las partículas liberadas desde el Sol están cargadas y grandes cantidades de ellas moviéndose en conjunto transportan consigo un sustancial campo magnético. Cuando estas partículas interactúan con la magnetosfera terrestre pueden producir perturbaciones en la ionosfera. Debido a la forma de la magnetosfera, las partículas cargadas tienden a moverse como a través de un embudo hacia los polos terrestres norte y sur. Las que tienen suficiente energía distorsionan (como si rompiesen) la ionosfera y causan tormentas en ese nivel de la atmósfera. Estos sucesos ocurren una o dos veces durante un ciclo solar.

Las perturbaciones de la ionosfera pueden producir otros problemas, como los siguientes:

- *Debilitamiento de ondas de radio de corta longitud de onda:* interrupciones en las comunicaciones.
- *Centelleos:* las comunicaciones por radio hacia y desde satélites pueden verse invadidas de “ruido” que hace la señal indescifrable o añade retrasos a señales horarias (temporales) que deben ser muy precisas.
- *Máxima frecuencia utilizable (maximum usable frequency, MUF):* se pueden perder altas frecuencias, lo que hace bajar la MUF.

Los océanos conducen fácilmente la electricidad y pueden transportar grandes corrientes eléctricas a lo largo de cientos de millas. Cuando estas corrientes alcanzan las costas, especialmente si la corteza terrestre es no conductora, los voltajes pueden saltar hasta cables y conductos, con potenciales de hasta miles de voltios.

Puede haber también otros problemas:

- Las corrientes inducidas en conductos de gas, petróleo... pueden aumentar su corrosión y acortar sus vidas.
- Organismos como tiburones, palomas y algunos tipos de bacterias utilizan los campos magnéticos para orientarse.
- Las tormentas causan una disminución de ozono, si bien ésta es una causa natural e inevitable.
- Las comunicaciones por radio y por satélite pueden estorbar la capacidad de los aviones y barcos para verificar sus posiciones reales.
- Los transformadores pueden sobrecalentarse y explotar. Todos los transformadores que operan en una red se pueden ver expuestos a esta corriente, lo que produciría un apagón.

Transparencia 21
Energía procedente del Sol:
conductora del clima terrestre

Hay también otra escala de tormentas que hace parecer ridículos los sucesos en Tierra: es la conocida como *medioambiente (o clima) espacial*, controlado esencialmente por el viento solar y las CMEs. El ciclo de 11 años de la actividad solar y las expulsiones coronales produce también variaciones en la cantidad de energía emitida por el Sol. Se cree que la actividad solar modifica el clima terrestre a lo largo del tiempo: la combinación del viento solar y la emisión de energía son sin duda factores esenciales del cambio climático y el calentamiento global.

- *Las imágenes de la transparencia muestran: el nivel de agua de la bahía de Chesapeake, una corriente de polvo del Sahara saliendo de la costa africana, un huracán en el Océano Atlántico, y una imagen infrarroja de Atlanta.*

Transparencia 22

La conexión Sol-Tierra

A simple vista el Sol apenas cambia. Pero una mirada más cercana y detallada revela que *convivimos con una estrella dinámica y turbulenta*. Haciendo uso de todos los avances que permite la alta tecnología espacial, telescopios y ordenadores en Tierra e incluso los antiguos dibujos a mano de la superficie del Sol, los científicos van poco a poco desvelando los secretos del sistema Sol-Tierra: escudriñan la “cara” del Sol buscando señales de fulguraciones y CMEs, monitorizan el viento solar para ver si trae “mal tiempo espacial”, y miden la energía que fluye en la alta atmósfera de la Tierra para ver si se está “fraguando” una tormenta magnética. Lo que ellos están descubriendo nos ayudará algún día a predecir el medioambiente o clima espacial y a entender mejor el impacto de nuestra estrella más cercana sobre la vida en la Tierra.