

# 1) LA ESTRUCTURA DEL SOL

Tabare Gallardo, feb 2002.

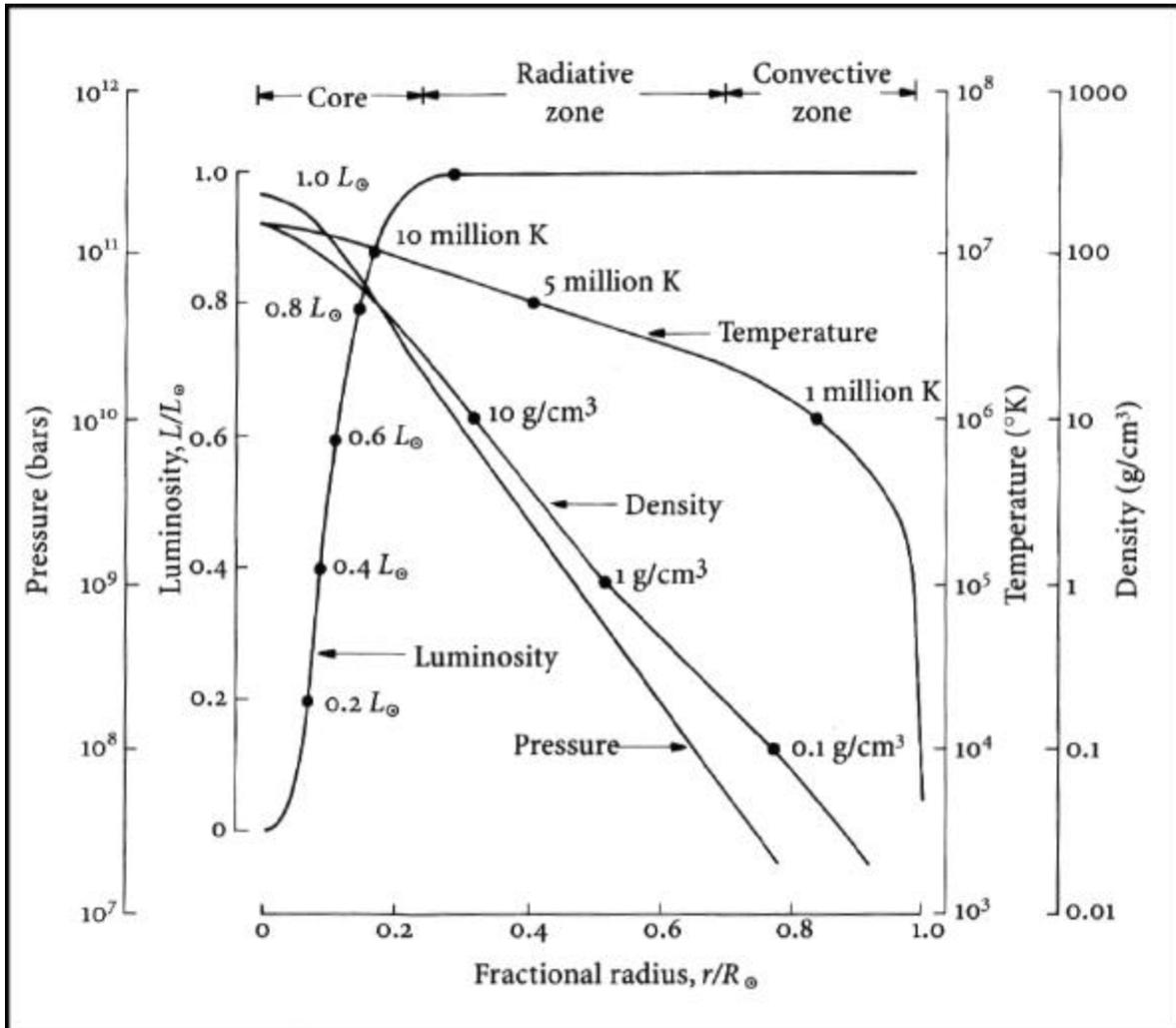
El Sol es una estrella de la secuencia principal, una de las 100.000 millones de estrellas que conforman nuestra galaxia. En la actualidad se encuentra proximo al brazo espiral Sagitario-Carina. La trayectoria orbital del Sol en la galaxia no es planar sino ondulante cruzando el plano de la galaxia cada 30 millones de años y completando una vuelta en torno del centro en 250 millones de años. El Sol es una esfera de gas casi perfecta (apenas achatado en los polos debido a su movimiento de rotacion) que se mantiene unida por su propia gravedad.

Si bien el sol presenta una rotacion y campos magneticos variables en principio podemos despreciarlos para obtener una descripcion aproximada de su interior. Calcular un modelo para el sol significa obtener la temperatura, densidad, presion y composicion quimica en funcion de la distancia al centro. Para esto partimos de una serie de leyes fisicas que sabemos se cumplen en la naturaleza y ciertas condiciones de borde como por ejemplo la temperatura superficial. Las ecuaciones se resuelven en forma numerica obteniendo graficos que representan las variables antes mencionadas en funcion de la distancia al centro.

Stellar theory <sup>a</sup>			
Conservation of mass	$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi\rho r^2$	(9.60)	$r$ radial distance $M_r$ mass interior to $r$ $\rho$ mass density
Hydrostatic equilibrium	$\frac{dp}{dr} = \frac{-G\rho M_r}{r^2}$	(9.61)	$p$ pressure $G$ constant of gravitation
Energy release	$\frac{dL_r}{dr} = 4\pi\rho r^2\epsilon$	(9.62)	$L_r$ luminosity interior to $r$ $\epsilon$ power generated per unit mass
Radiative transport	$\frac{dT}{dr} = \frac{-3}{16\sigma} \frac{\langle\kappa\rangle\rho}{T^3} \frac{L_r}{4\pi r^2}$	(9.63)	$T$ temperature $\sigma$ Stefan-Boltzmann constant $\langle\kappa\rangle$ mean opacity
Convective transport	$\frac{dT}{dr} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{T}{p} \frac{dp}{dr}$	(9.64)	$\gamma$ ratio of heat capacities, $c_p/c_v$

<sup>a</sup>For stars in static equilibrium with adiabatic convection. Note that  $\rho$  is a function of  $r$ .  $\kappa$  and  $\epsilon$  are functions of temperature and composition.

Los rayos gamma producidos en las reacciones nucleares en el nucleo del Sol se dispersan, absorben o son reemitidos por electrones libres, iones y atomos en su camino hacia la superficie. Un rayo gamma tipico sufre  $10^{26}$  absorciones y reemisiones hasta salir a la superficie lo cual le lleva tipicamente cientos de miles de años. La **opacidad** es una medida de la eficiencia con que la materia inhibe el pasaje de los fotones a traves del interior solar. Su valor depende de los varios procesos que pueden actuar simultaneamente: transiciones electronicas, ionizacion, dispersion por electrones, iones y atomos. La estructura del Sol depende sensiblemente de la opacidad, si esta cambia todos los parametros del sol deberan ajustarse de tal manera que toda la energia generada llegue a la superficie y no quede bloqueada en algun punto interior al Sol.

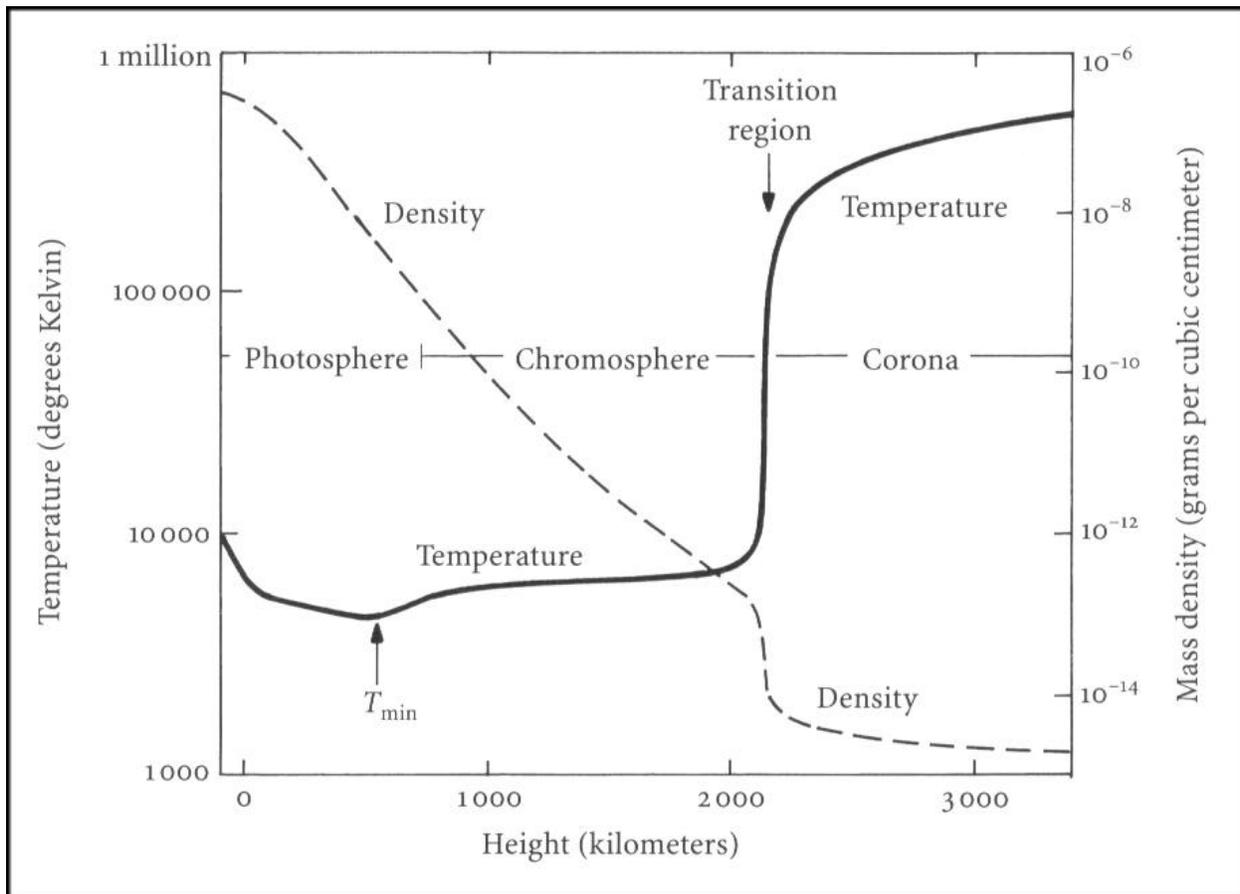


La energía que se genera en el interior del Sol debe ser transportada hacia el exterior. Existen tres mecanismos para esto: transporte **radiativo** es decir a través de fotones, transporte **convectivo** es decir por movimiento de gases y transporte por **conducción** es decir colisiones entre las partículas resultando una transferencia de energía entre partículas en contacto. Este último mecanismo no es relevante en el Sol. Como resultado el Sol presenta **zonas radiativas** y **zonas convectivas**

El **núcleo** del sol es un reactor de fusión estabilizado gravitacionalmente. La materia se encuentra casi completamente ionizada debido a las altas temperaturas. Es una esfera con un radio igual a la quinta parte que el solar. En el núcleo en cada segundo 5 millones de toneladas de masa son transformadas en energía.

La **zona radiativa** llega hasta la mitad del radio solar, la energía se transporta por la difusión de los fotones en un medio altamente ionizado.

Por encima de la zona radiativa la temperatura desciende lo suficiente como para que existan átomos parcialmente ionizados y neutros lo cual amplía las posibilidades de la materia de absorber fotones aumentando notoriamente la opacidad del medio. La alta opacidad hace difícil la continuación de la radiación de los fotones hacia el exterior y esto provoca una caída rápida de la temperatura con la distancia al centro lo cual a su vez provoca que se instale a partir de allí un **regimen convectivo**. Las capas exteriores del sol se encuentran en equilibrio convectivo y es allí donde se generan los fenómenos propios de la actividad solar. La **atmósfera solar** que sigue a la zona convectiva se divide en 3 capas: **fotosfera**, **cromosfera** y **corona**.



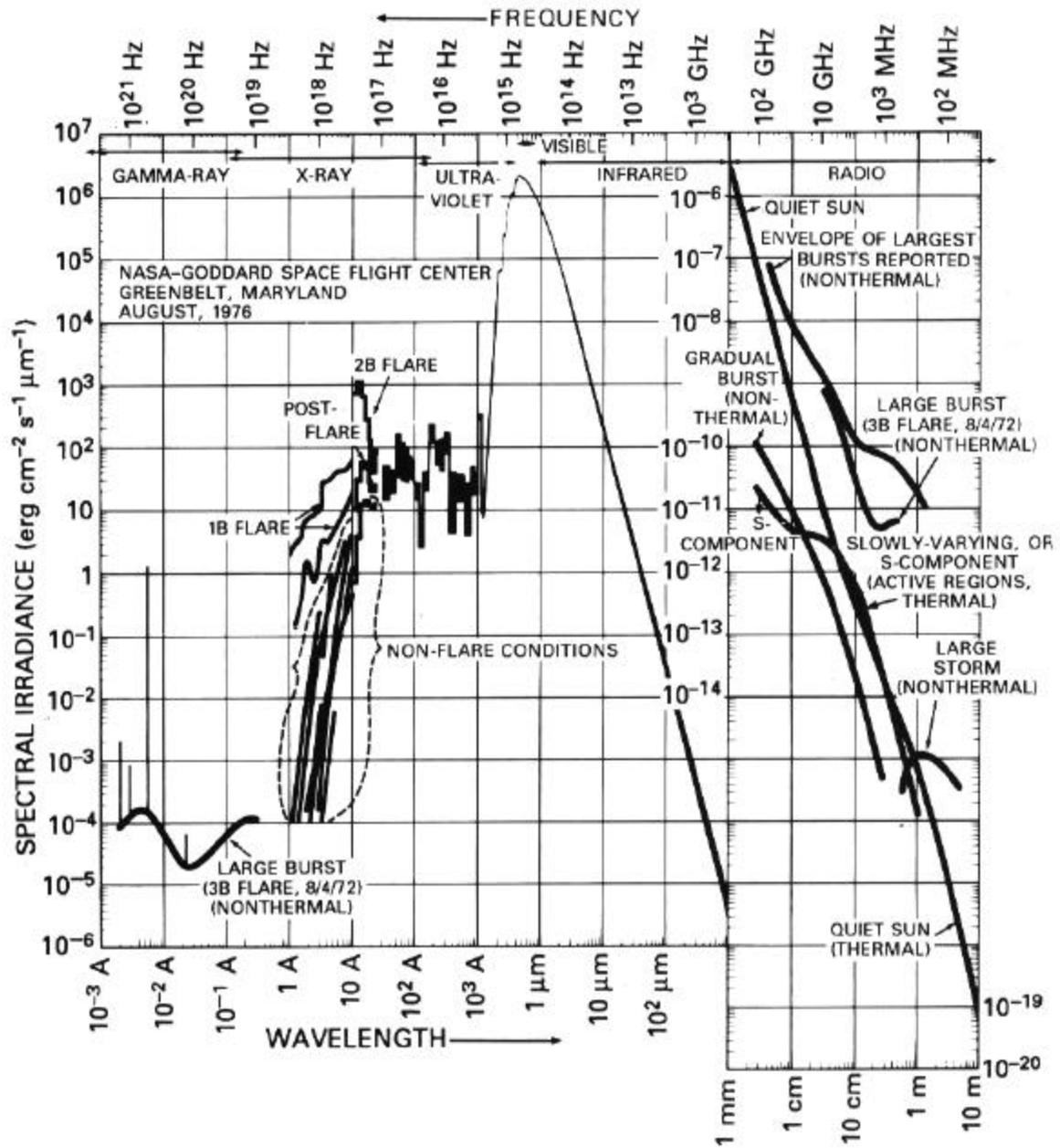
La **fotosfera** tiene un espesor de 500 kms y su límite exterior es el límite del globo solar visible. Casi todos los fotones que recibimos salen de la fotosfera. El gas que la compone se encuentra en equilibrio térmico con la radiación que la atraviesa por lo cual pueden ser aplicables las leyes de radiación de cuerpo negro.

La **cromosfera** es una región de transición que se extiende 2000 kms por encima de la fotosfera. Es más caliente que la fotosfera (10000 K) debido al efecto de ondas hidromagnéticas y de compresión vinculadas a los espículos y granulos. La emisión de energía es fundamentalmente en la línea H alfa.

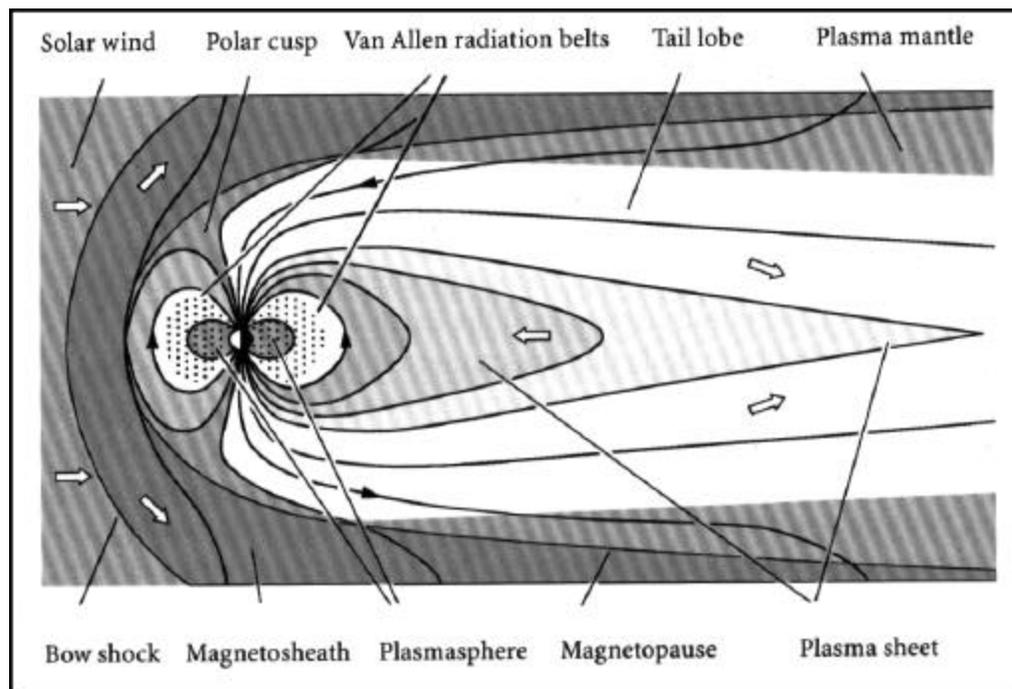
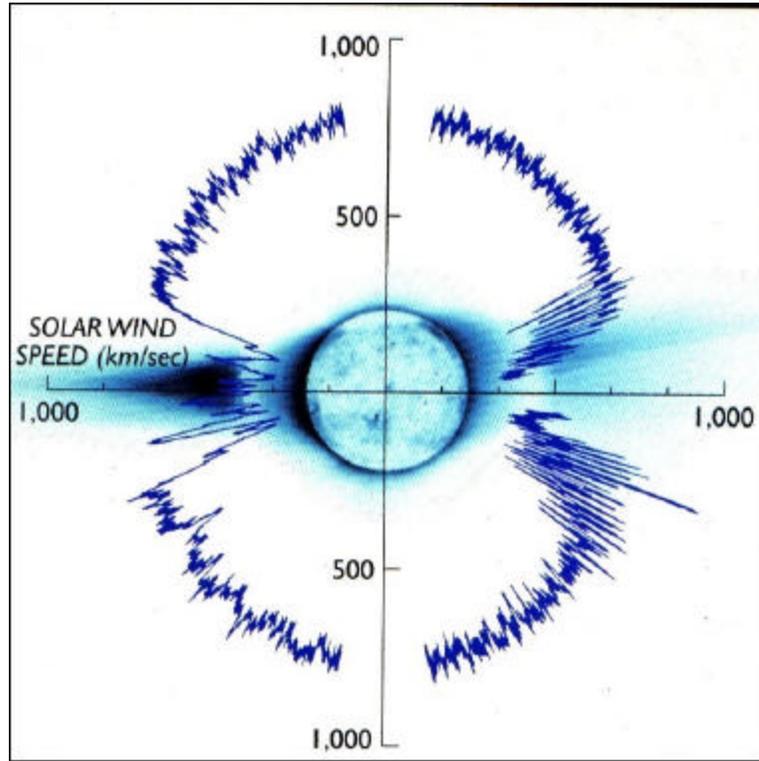
La **corona** consiste de plasma muy caliente (2 millones de grados, no está en equilibrio térmico con la radiación que corresponde a 5800 K) fluyendo gradualmente hacia el medio interplanetario en forma de **viento solar**. La energía de la corona proviene de la disipación de energía mecánica desde la zona convectiva y de la disipación de la energía magnética por reconexión de líneas de campo. La radiación de rayos X solar observada es originada en la corona.

## The solar spectrum

The solar spectral irradiance from radio waves to gamma-rays.  
 (Courtesy H. Malitson and the National Space Science Data Center.)

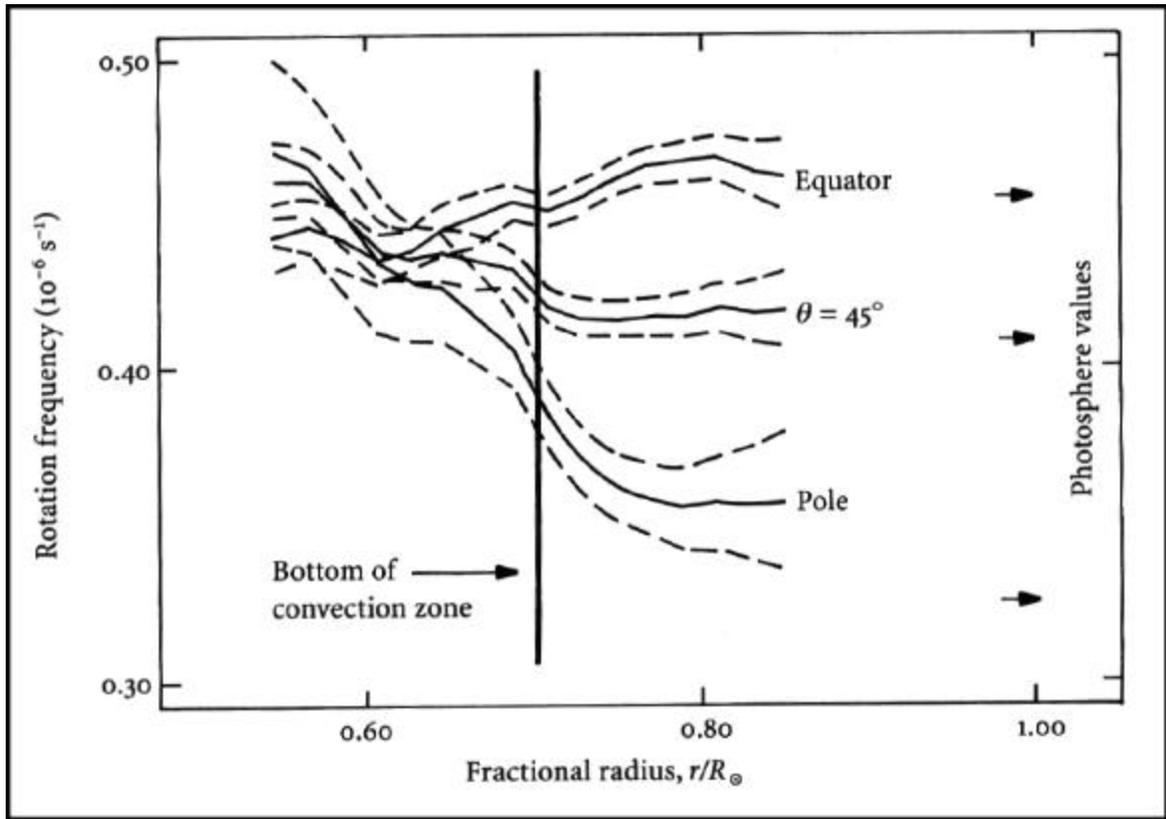


# VIENTO SOLAR Y SU EFECTO EN LA TIERRA



## ROTACION Y PULSACIONES

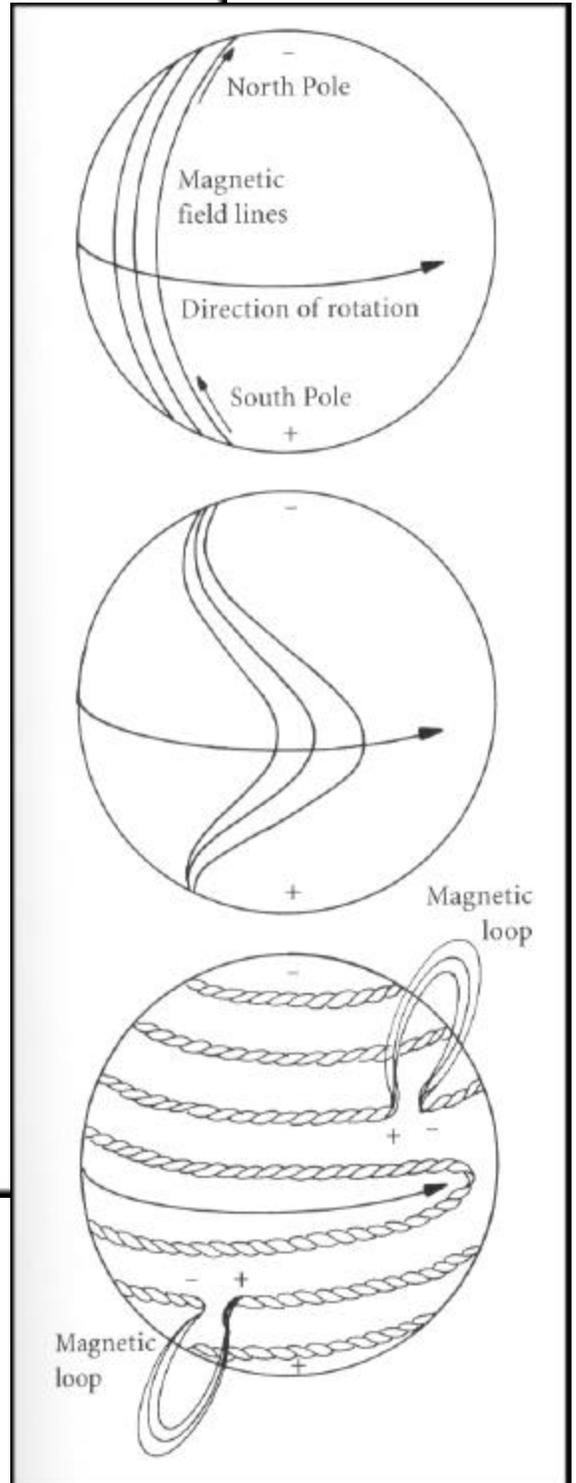
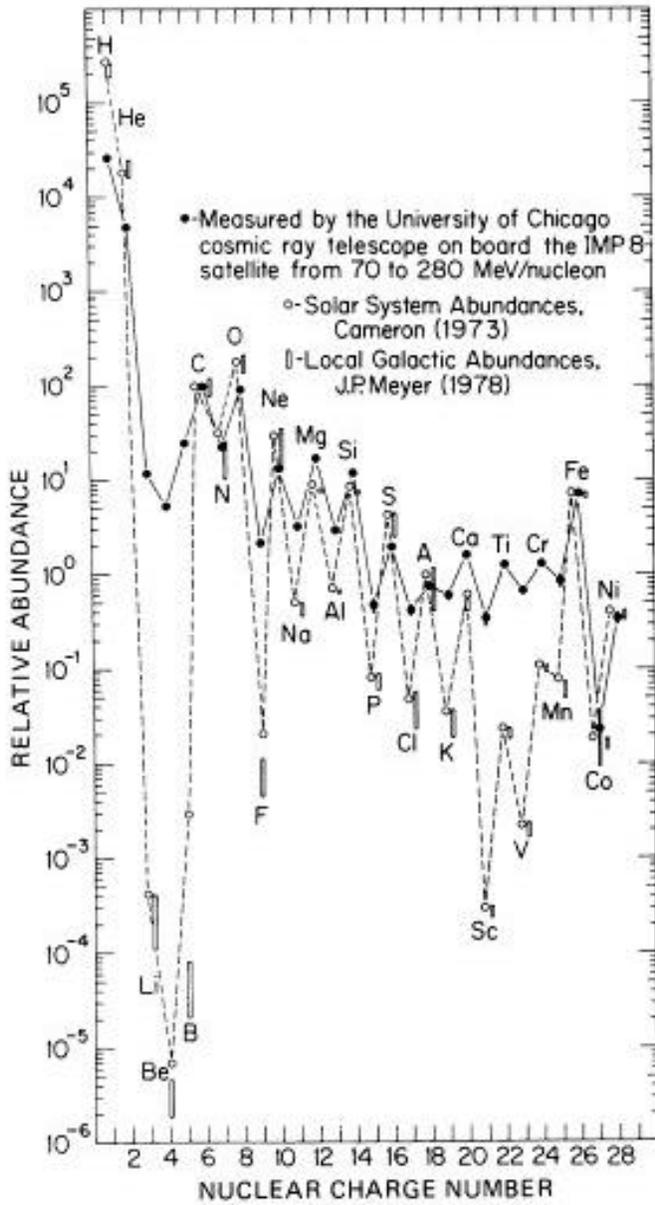
El Sol no rota como un cuerpo rígido sino que su movimiento rotacional depende de su distancia al centro y de su latitud solar. Esta rotación diferencial es la responsable del continuo retorcimiento de las líneas de los intensos campos magnéticos locales lo que lleva a la destrucción de los mismos (periodos de mínima actividad) y a su reconstrucción con la polaridad invertida al cabo de 11 años (máxima actividad). Se ha encontrado que el Sol vibra o resuena con varios periodos del orden de minutos. El origen parece ser movimientos internos en la región convectiva.



## CAMPO MAGNETICO

Toda la actividad solar está conectada al ciclo de 22 años de su campo magnético (ciclo de **Hale**). Las capas convectivas del Sol convierten la turbulencia y la rotación diferencial en un campo magnético oscilante confinado a la zona convectiva generado por un mecanismo de dinamo.

Comparison of the abundances of the elements in the galactic cosmic rays with the solar abundances (normalized to C). (Courtesy of C. Meyer, University of Chicago.)



GENERACION DE ENERGIA

Stellar fusion processes <sup>a</sup>		
<p>PP I chain</p> $p^+ + p^+ \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu_e$ ${}^2_1\text{H} + p^+ \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$ ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2p^+$	<p>PP II chain</p> $p^+ + p^+ \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu_e$ ${}^2_1\text{H} + p^+ \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$ ${}^3_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + \gamma$ ${}^7_4\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7_3\text{Li} + \nu_e$ ${}^7_3\text{Li} + p^+ \rightarrow 2{}^4_2\text{He}$	<p>PP III chain</p> $p^+ + p^+ \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu_e$ ${}^2_1\text{H} + p^+ \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$ ${}^3_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + \gamma$ ${}^7_4\text{Be} + p^+ \rightarrow {}^8_5\text{B} + \gamma$ ${}^8_5\text{B} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + e^+ + \nu_e$ ${}^8_4\text{Be} \rightarrow 2{}^4_2\text{He}$
<p>CNO cycle</p> ${}^{12}_6\text{C} + p^+ \rightarrow {}^{13}_7\text{N} + \gamma$ ${}^{13}_7\text{N} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + e^+ + \nu_e$ ${}^{13}_6\text{C} + p^+ \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + \gamma$ ${}^{14}_7\text{N} + p^+ \rightarrow {}^{15}_8\text{O} + \gamma$ ${}^{15}_8\text{O} \rightarrow {}^{15}_7\text{N} + e^+ + \nu_e$ ${}^{15}_7\text{N} + p^+ \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$	<p>triple-<math>\alpha</math> process</p> ${}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \rightleftharpoons {}^8_4\text{Be} + \gamma$ ${}^8_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightleftharpoons {}^{12}_6\text{C}^*$ ${}^{12}_6\text{C}^* \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \gamma$	<p><math>\gamma</math> photon  <math>p^+</math> proton  <math>e^+</math> positron  <math>e^-</math> electron  <math>\nu_e</math> electron neutrino</p>

<sup>a</sup>All species are taken as fully ionised.

## 2) ACTIVIDAD SOLAR

Tabare Gallardo, feb 2002.

Se entiende por actividad solar la serie de fenomenos transitorios que ocurren en su atmosfera.

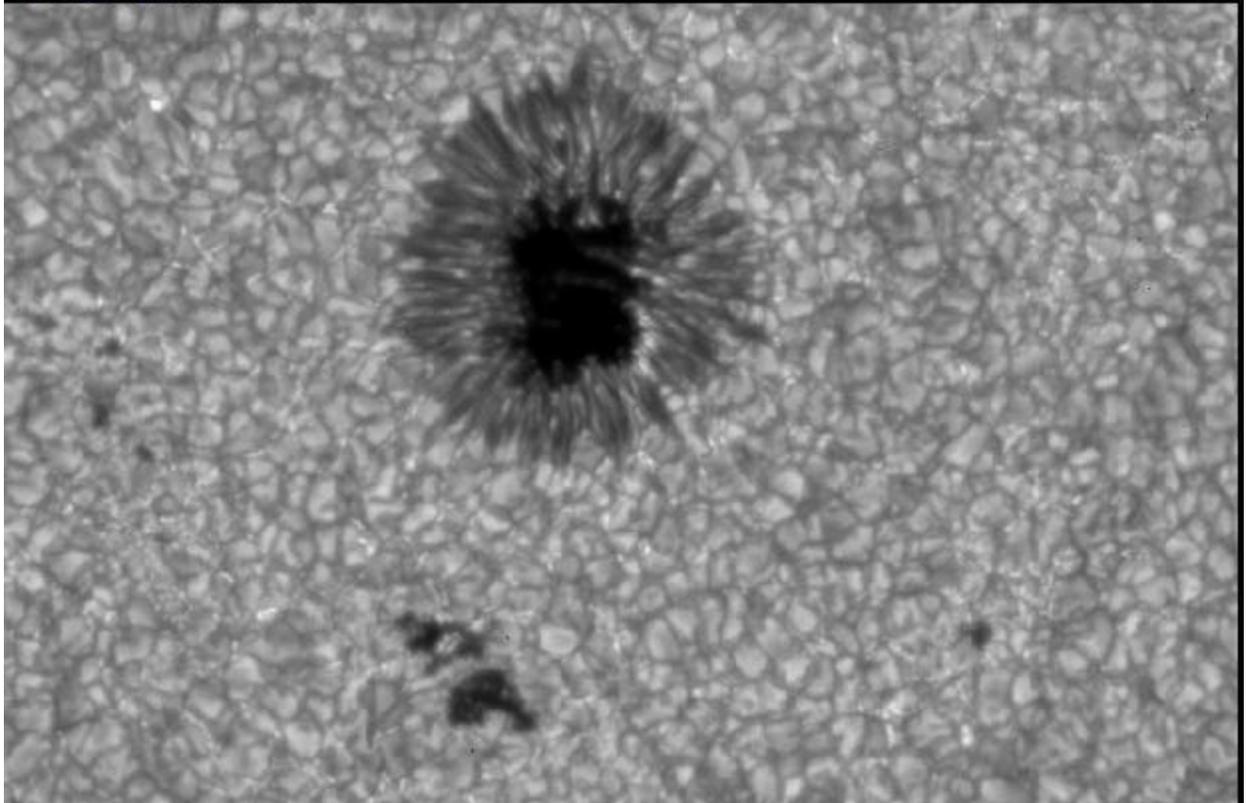
**En la fotosfera encontramos granulos, faculas y manchas.**

**Granulos:** celulas convectivas de centenares de kms de diametro que transfieren la energia desde la zona convectiva hacia el exterior. Tienen una vida media de algunos minutos.

**Faculas:** son regiones que en el visible son mas brillantes que el resto de la fotosfera por ser mas densas y calientes.

**Manchas:** son producidas por concentraciones de fuertes campos magneticos en la fotosfera. Pueden llegar a tener 50000 kms de diametro y duran varios dias o semanas. Se encuentran en latitudes solares menores a 35 grados. Cada mancha es un polo por lo que en general las manchas aparecen de a pares o en grupos interactuando magneticamente. Son mas frias pues los intensos campos magneticos aislan el gas del resto de la fotosfera.

14 June 1994: G-Band



Source: Kiepenheuer/Uppsala/Lockheed (P. Brandt, G. Simon, G. Scharmer, C. Shine)

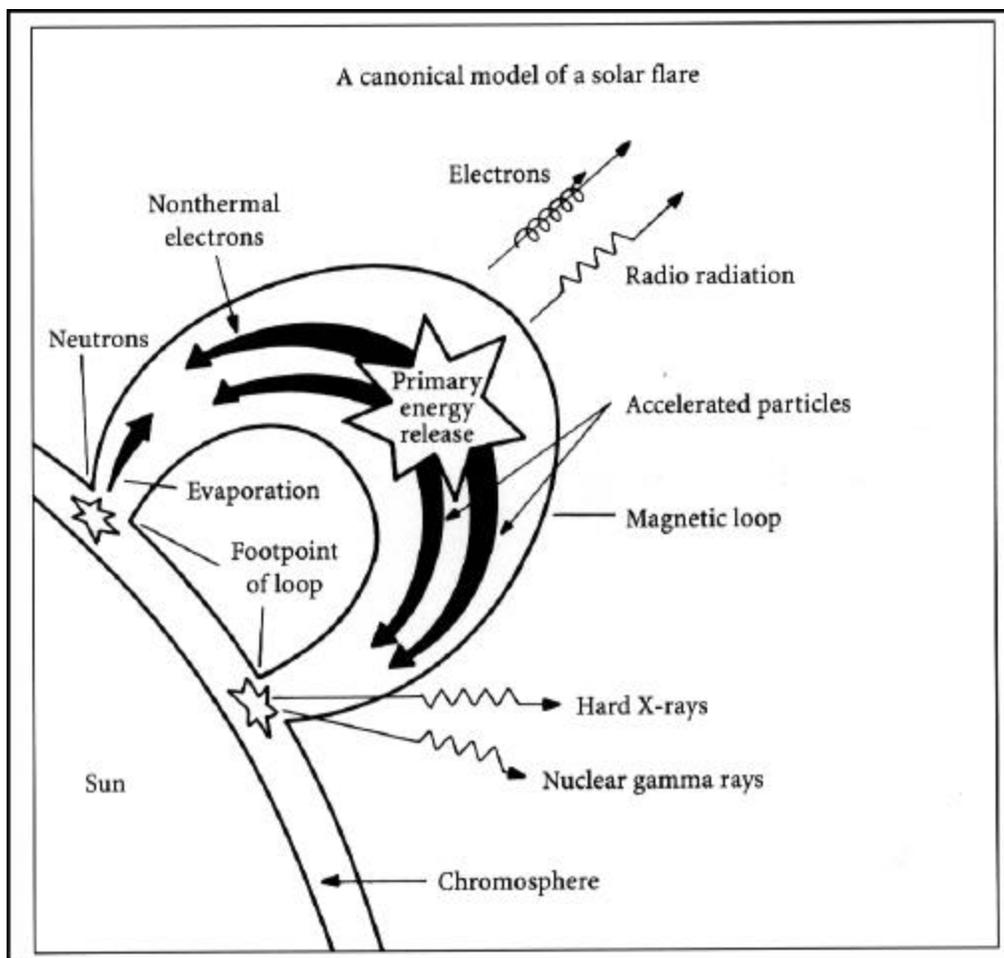
HA3 A-003

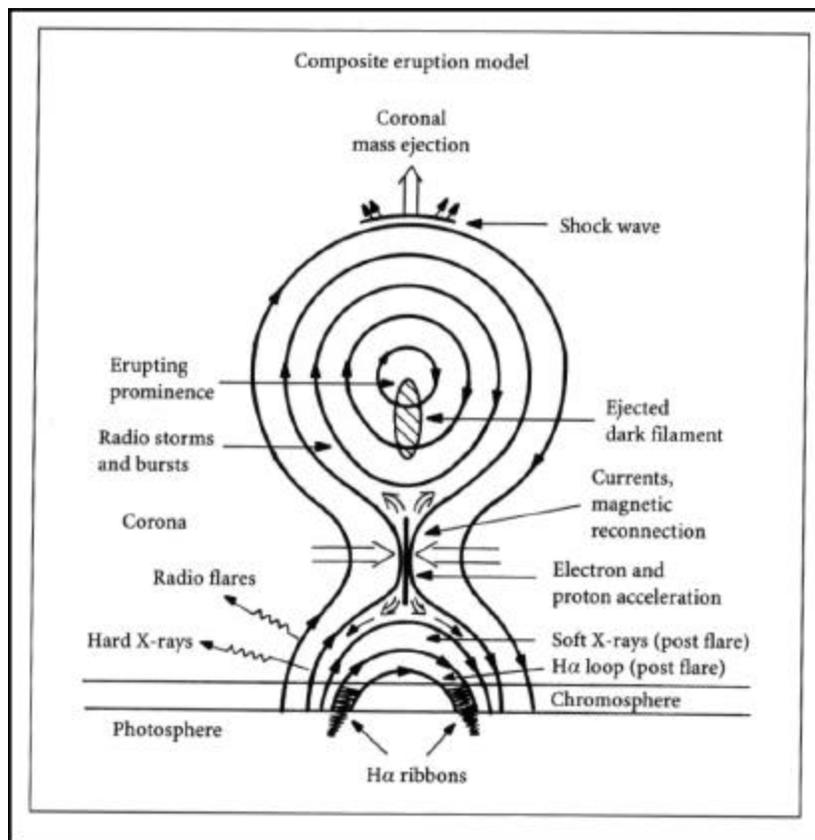
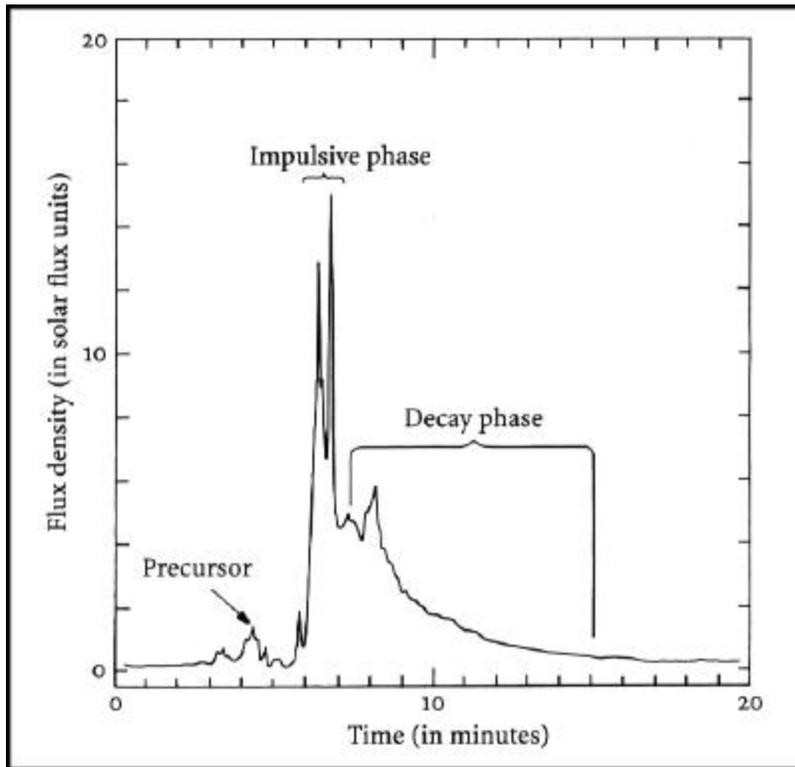
**En la cromosfera encontramos espiculos, flares y plages.**

**Espiculos:** en H alfa presentan el aspecto de cabellos saliendo y cayendo desde la cromosfera alcanzando la corona. Tienen una vida de algunos minutos y pueden alcanzar 15000 kms de altura.

**Flares:** son erupciones de partículas y radiaciones en un amplio espectro de energías (desde X hasta radio) que acompañan a las manchas y que ocurren en forma de explosiones en la corona. Tienen vida de algunos minutos y temperaturas de hasta centenares de millones de grados. Las partículas eyectadas alcanzan la Tierra horas o días después produciendo interferencia en comunicaciones y auroras. Parecen ser producidas por la inyección abrupta de grandes cantidades de energía magnética en pequeñas regiones de la corona.

**Plages:** son regiones en la cromosfera que en H alfa se aprecian como más brillantes y se corresponden con regiones activas ubicadas más abajo en la fotosfera.





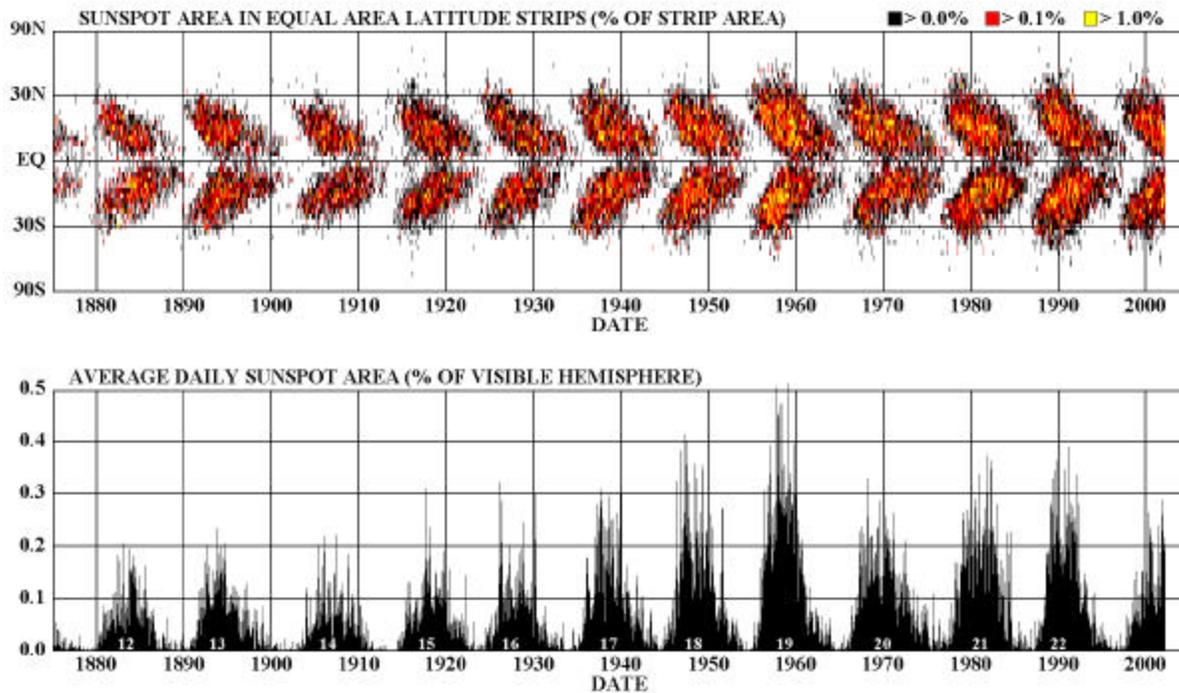
**En la corona se desarrollan prominencias y otras estructuras como eyecciones masivas.**

**Prominencias:** son regiones de gas frio (10000 K) y denso embebido en la corona de baja densidad y alta temperatura (millones de grados). Ocurren en regiones de campos magneticos horizontales que las sostienen. Cuando se observan proyectadas sobre el disco solar se las suele llamar **filamento**. Pueden estar asociadas a regiones activas (prominencias activas) o alejadas de las mismas (prominencias quiescentes). Pueden tambien ser eruptivas en cuyo caso estan asociadas a eyecciones coronales de masa.

**Eyecciones coronales de masa:** es una burbuja magnetica de plasma eyectada a gran velocidad desde la corona.

## EL CICLO DE 22 AÑOS DE ACTIVIDAD DEL SOL

### DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS

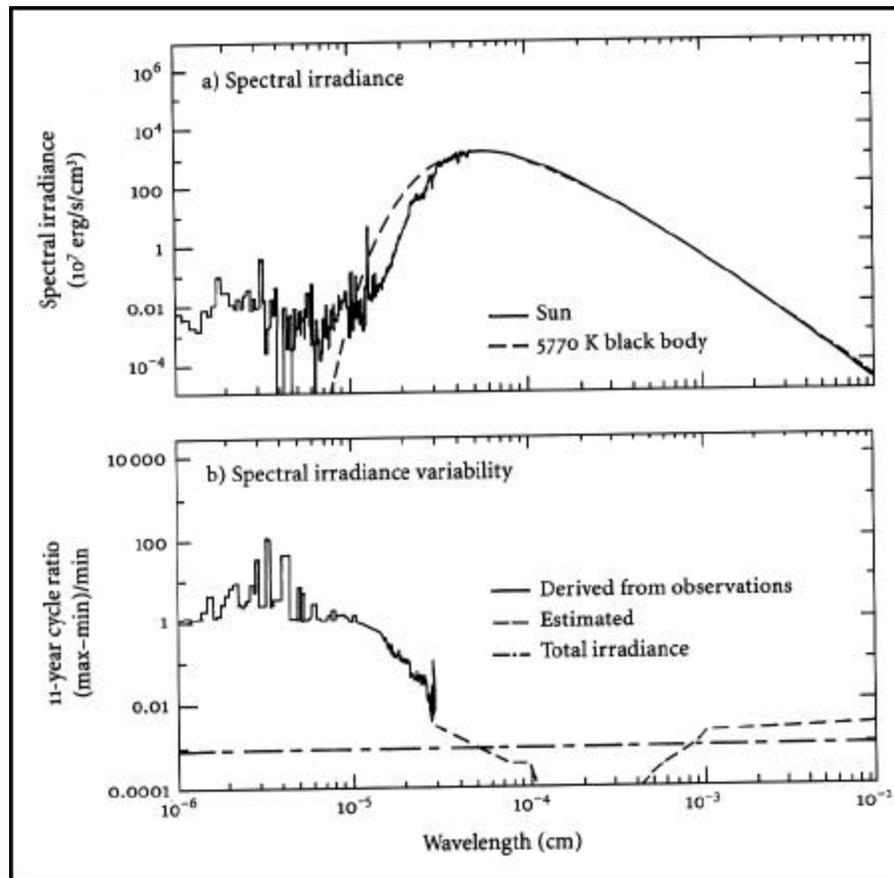


### 3) LA VARIACION DE LA RADIACION SOLAR Y SU RELEVANCIA PARA LA TIERRA

Tabare Gallardo, feb 2002.

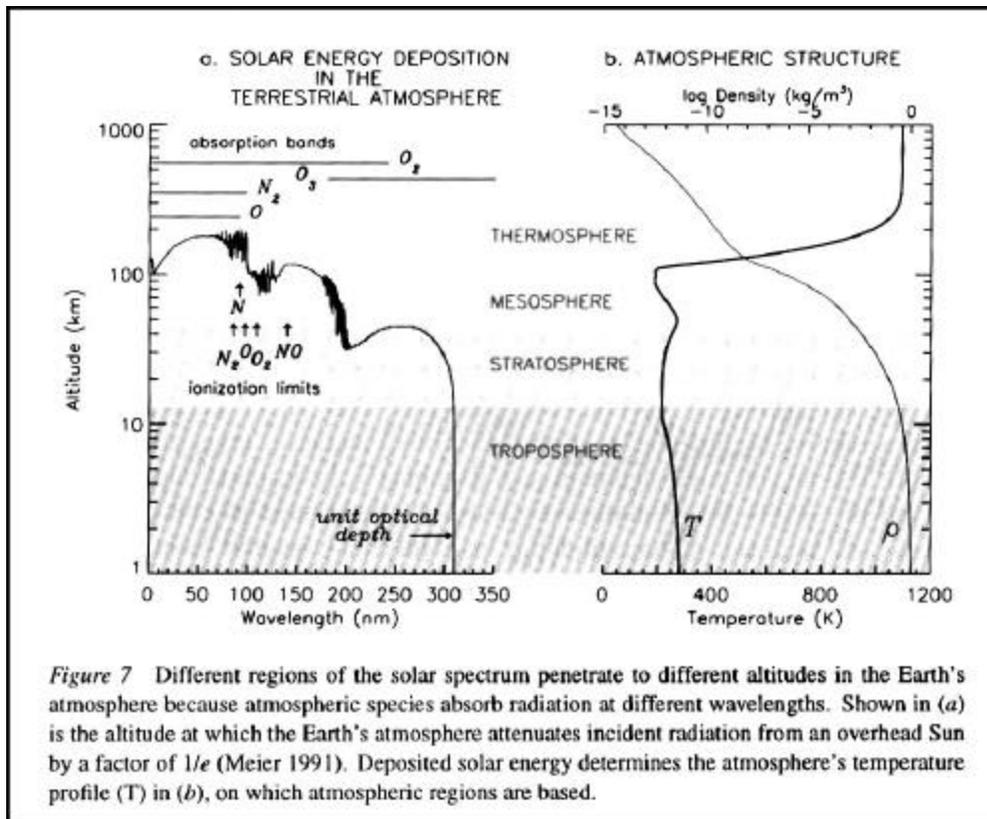
Los fenomenos magneticos son fuente de significativa variacion de radiacion solar. Ademas del periodo de 27 dias debido a la rotacion solar, estos fenomenos presentan un ciclo de 11 años que, muy probablemente, es debido a la distorsion de las lineas de campo debido a la rotacion diferencial del Sol. No es posible afirmar esto con certeza aun debido a que el monitoreo sistematico del sol es muy reciente cubriendo apenas 2 ciclos. Algunos investigadores sostienen que el ciclo de 11 años y sus variaciones a lo largo de la historia podria estar viculado al movimiento del Sol en torno del baricentro del sistema solar determinado fundamentalmente por el planeta Jupiter. La variacion de la actividad magnetica produce cambios en el aspecto de las manchas solares, faculas y plages que alteran el flujo neto del Sol modificando la densidad y temperatura de su atmosfera. La actividad solar no afecta al espectro solar de manera uniforme. Manchas y faculas por ejemplo afectan el visible e infrarrojo, en cambio las plages incrementan el flujo en UV. La radiacion de la corona tiene su efecto en UV pues la emision del plasma es aumentada en los bucles de los campos magneticos ubicados sobre las grandes regiones activas que incluyen las manchas fotosfericas y las plages cromosfericas. Si bien la actividad solar presenta fluctuaciones seculares y de varias decadas no hay registros confiables de la variacion de la radiacion total la cual debe medirse desde el espacio. Como las estrellas sin aparente actividad son menos brillantes que aquellas con ciclos de actividad se ha especulado con la posibilidad de que durante el Minimo de Maunder (siglo 17) el flujo total solar haya disminuido explicando asi la edad de frio que entonces se vivio en europa. En ese periodo, ademas de la ausencia de manchas pudo haber una disminucion del periodo de rotacion y un aumento del diametro solar.

Durante el ciclo de 11 años la variacion observada de la radiacion total es de aproximadamente 0.15%, pero en el extremo ultravioleta la radiacion puede llegar al 100%.

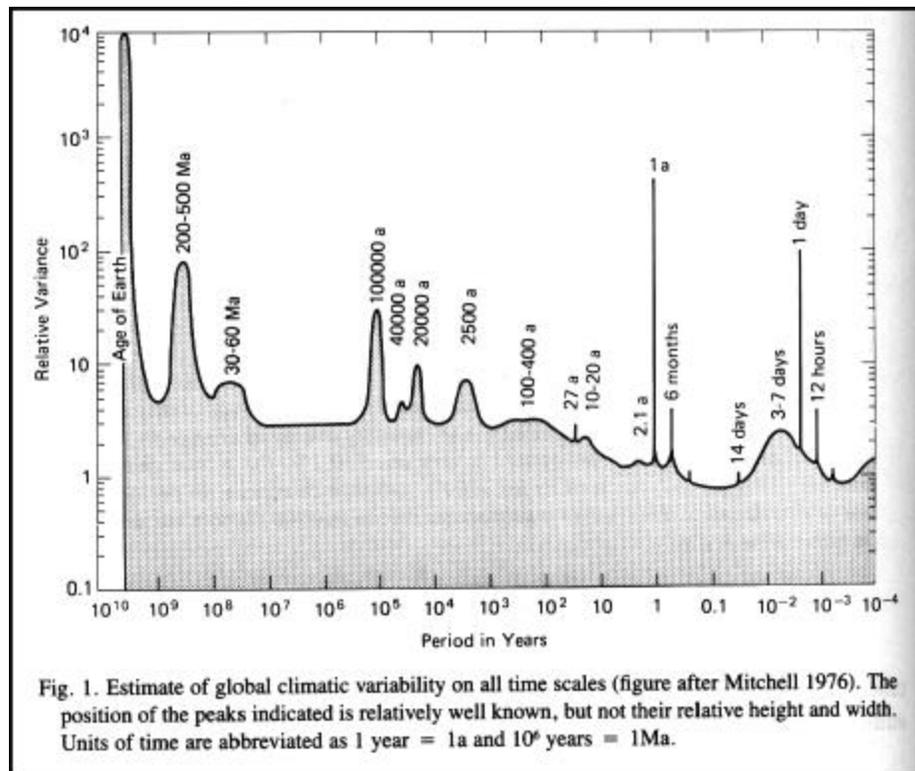
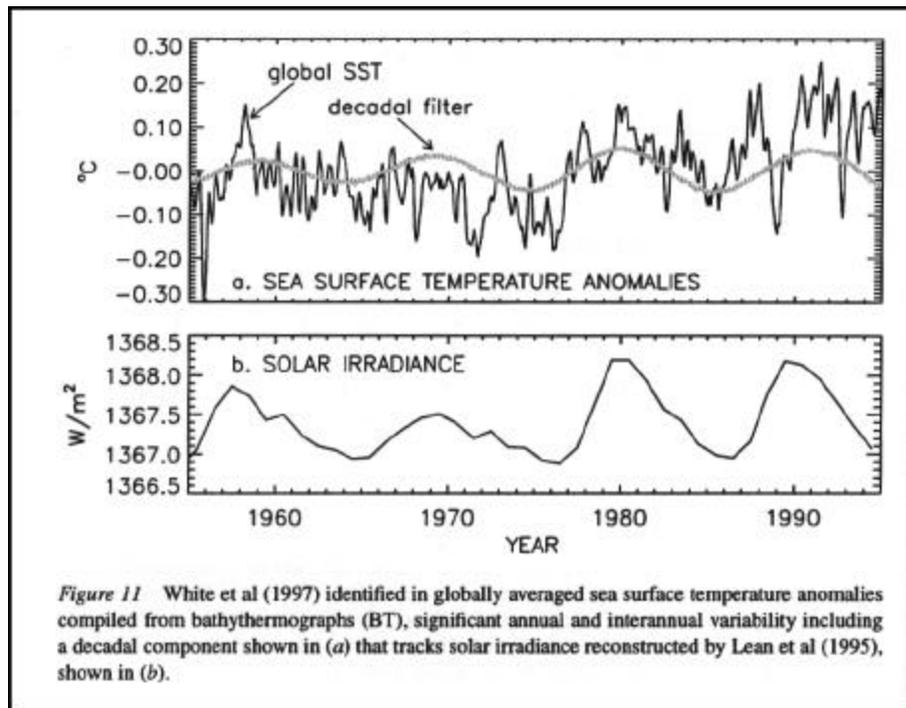


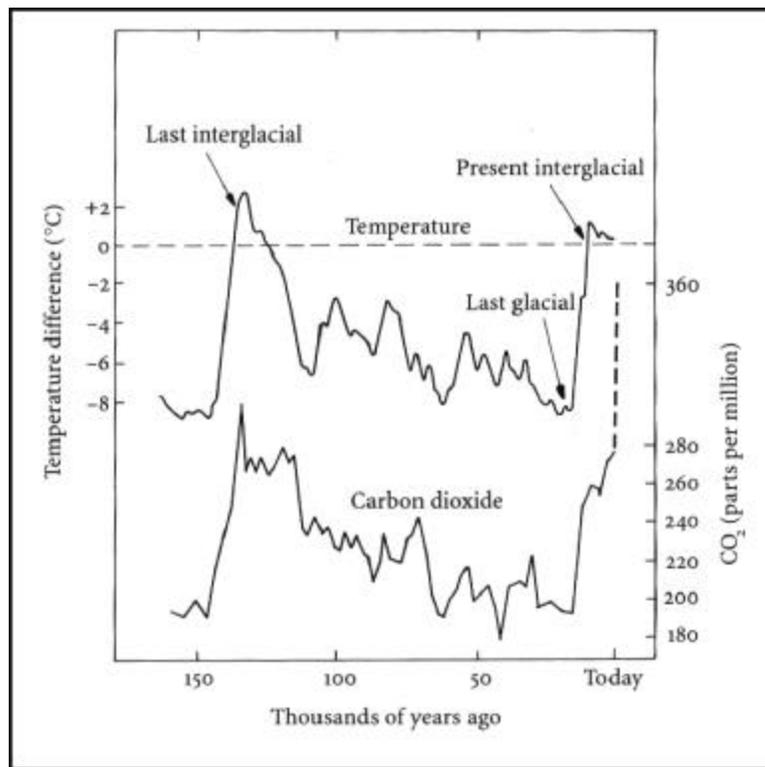
La atmosfera terrestre, una mezcla de gases que se extiende centenares de kilometros por encima de su superficie, es relativamente transparente al visible e IR proximo permitiendo que el 99% de la radiacion solar logre penetrar en la **troposfera**, donde reside el grueso de la atmosfera, donde el tiempo y el clima tienen lugar y donde tiene lugar la biosfera. El 33% de esa energia es reflejada y el 67% es absorbida por el suelo y atmosfera produciendo una temperatura de equilibrio de 255 K. A esta temperatura la Tierra reemite radiacion infrarroja que es reabsorbida por los gases de la atmosfera. Debido a este **efecto invernadero** la temperatura superficial de la Tierra llega a los 288 K.

La radiacion UV solar si bien es solo el 1% y no afecta directamente la superficie terrestre **controla todo el perfil termico de la atmosfera** por encima de la troposfera y la mayor parte de los procesos quimicos, dinamicos y radiativos. La radiacion UV absorbida por el ozono a algunas decenas de kms de altura es la responsable del calentamiento de la **estratosfera**. Mas arriba el oxigeno molecular se disocia debido a la radiacion UV generando los atomos que permiten la formacion del **ozono**. Tanto el oxigeno como el nitrógeno absorben UV siendo los responsables de la temperatura de la **termosfera** (1000 K) a alturas superiores a los 200 km. Finalmente la radiacion UV es la responsable de la ionizacion del nitrógeno y oxigeno formandose como consecuencia una atmosfera de plasma debilmente ionizado llamada **ionosfera** que se encuentra embebida en la atmosfera neutra entre los 50 y los 1000 kms.



Se han encontrado ciclos de 11 y 22 años en un amplio espectro de datos climaticos como temperaturas de tierra, oceanos y troposfera, lluvias, incendios forestales y ciclones. En escalas de tiempo mayores en los **registros paleoclimaticos** es evidente una periodicidad de edades de hielo que ocurren cada 100000 años que parece asociada a las oscilaciones en la excentricidad de la orbita terrestre (**efecto Milankovitch**) pero que los modelos climaticos no han logrado aun explicar.





La temperatura superficial terrestre ha crecido en correlación con el incremento de CO<sub>2</sub> por parte del hombre. Sin embargo existen indicaciones de variaciones en la temperatura del planeta en periodos anteriores a la industrialización (de 1610 a 1800) que parecen responder a la actividad solar. Por ejemplo, la edad de frío vivida en Europa en donde la temperatura media bajo 0.5 grados coincidente con el mínimo de Maunder pudo ser originada por un decrecimiento de 0.25% en la radiación total del Sol.

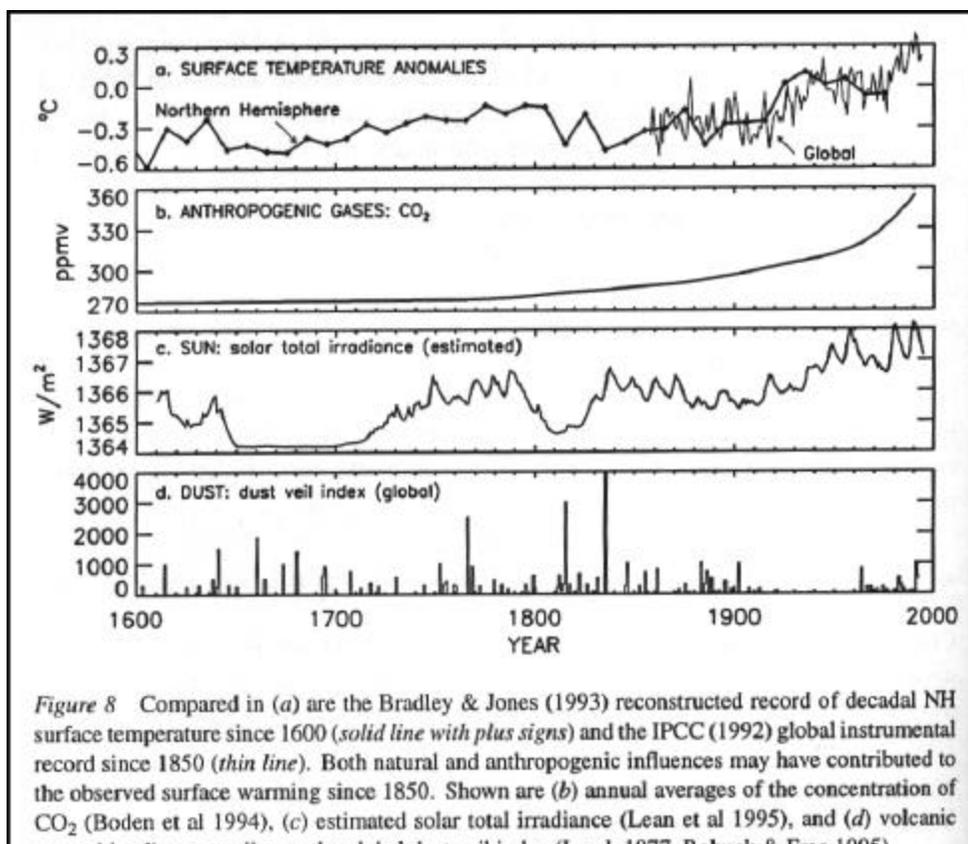
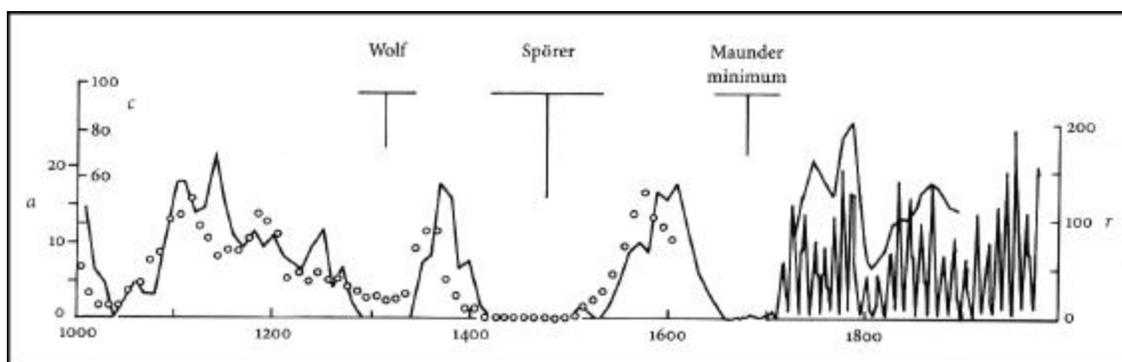


Figure 8 Compared in (a) are the Bradley & Jones (1993) reconstructed record of decadal NH surface temperature since 1600 (solid line with plus signs) and the IPCC (1992) global instrumental record since 1850 (thin line). Both natural and anthropogenic influences may have contributed to the observed surface warming since 1850. Shown are (b) annual averages of the concentration of CO<sub>2</sub> (Boden et al 1994), (c) estimated solar total irradiance (Lean et al 1995), and (d) volcanic dust loading to the global dust veil index (Lean 1977; Deluck & Egan 1995).



La concentración media de ozono en la atmósfera terrestre muestra una constante caída en los 20 años lo cual implica un incremento sostenido del flujo UV sobre la superficie. Esto es atribuido al efecto de los CFC producidos por el hombre. Además el CO<sub>2</sub> producido por el hombre puede estar enfriando la estratosfera y con esto alterando la capacidad del ozono de reaccionar con otros componentes atmosféricos. Son muchos los factores que se combinan para alterar la concentración de ozono y no es sencillo obtener un modelo que lo explique satisfactoriamente. Por ejemplo, si bien es cierto que una mayor actividad solar implica mayor destrucción del ozono también es cierto que cuanto mayor sea la radiación UV que llega a la atmósfera habrá mayor producción de O atómico y en consecuencia mayor tasa de producción de moléculas de ozono.

Las alteraciones de los niveles de ozono podrían producir un calentamiento o un enfriamiento neto en la Tierra dependiendo del balance de energías entre UV e IR. Asimismo, variaciones en los gradientes de temperatura entre troposfera y estratosfera pueden alterar significativamente la circulación en todo el globo modificando el tiempo y clima.

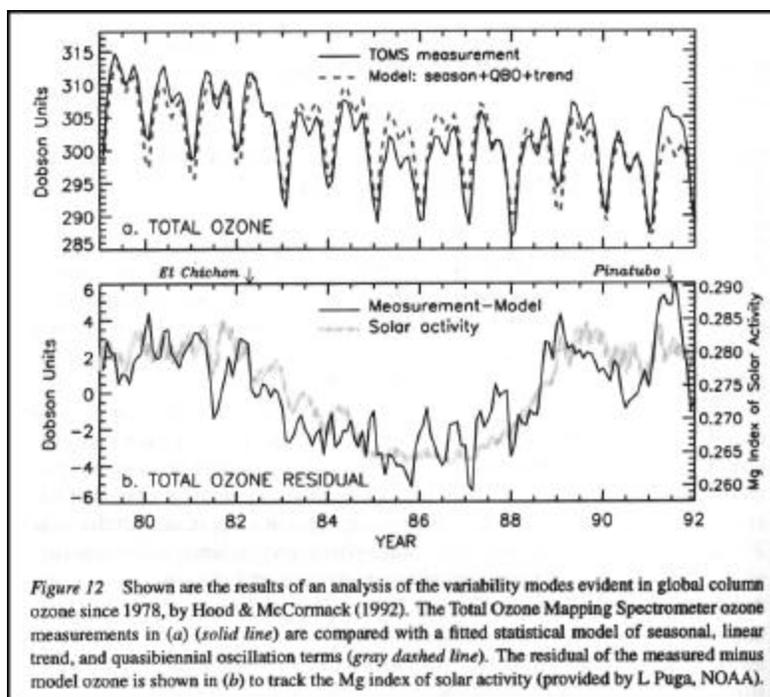


Figure 12 Shown are the results of an analysis of the variability modes evident in global column ozone since 1978, by Hood & McCormack (1992). The Total Ozone Mapping Spectrometer ozone measurements in (a) (solid line) are compared with a fitted statistical model of seasonal, linear trend, and quasi-biennial oscillation terms (gray dashed line). The residual of the measured minus model ozone is shown in (b) to track the Mg index of solar activity (provided by L. Puga, NOAA).

## 4) EL ENTORNO GALACTICO DEL SOL

Tabare Gallardo, feb 2002.

En torno del 98% del material gaseoso presente en la heliosfera es de origen interestelar. No sabemos cómo este material puede afectar el entorno y atmosferas de los planetas de nuestro sistema. Este hecho presenta mas relevancia al comprobar que el entorno galactico esta lejos de ser homogéneo. A lo largo de su historia es evidente que el Sol a pasado por entornos galacticos muy diferentes. Este flujo hacia el sistema solar es modulado por el variable viento solar (que presenta el ciclo de 11 años y que depende de la latitud solar). El Sol presenta un movimiento de oscilacion en torno del plano galactico cruzandolo cada 33 millones de años y con una amplitud de 230 años luz. A su vez gira en tono del centro galactico cada 250 millones de años. El viento interestelar resultante es la composicion del movimiento del Sol respecto a la llamada **Nube Interestelar Local** formada en un 99% de gas (9 partes de H y una de He) y 1% de polvo. Su velocidad respecto al Sol es de unos 26 km/s.

El Sol se encuentra en el borde de la llamada **Burbuja Local**, un vacio 10000 mas puro que el de las nubes interestelares típicas que a su vez son miles de veces mas puras que el mejor vacio obtenido en Tierra. La trayectoria actual del Sol indica que acaba (algunos millones de años) de salir de la Burbuja Local.

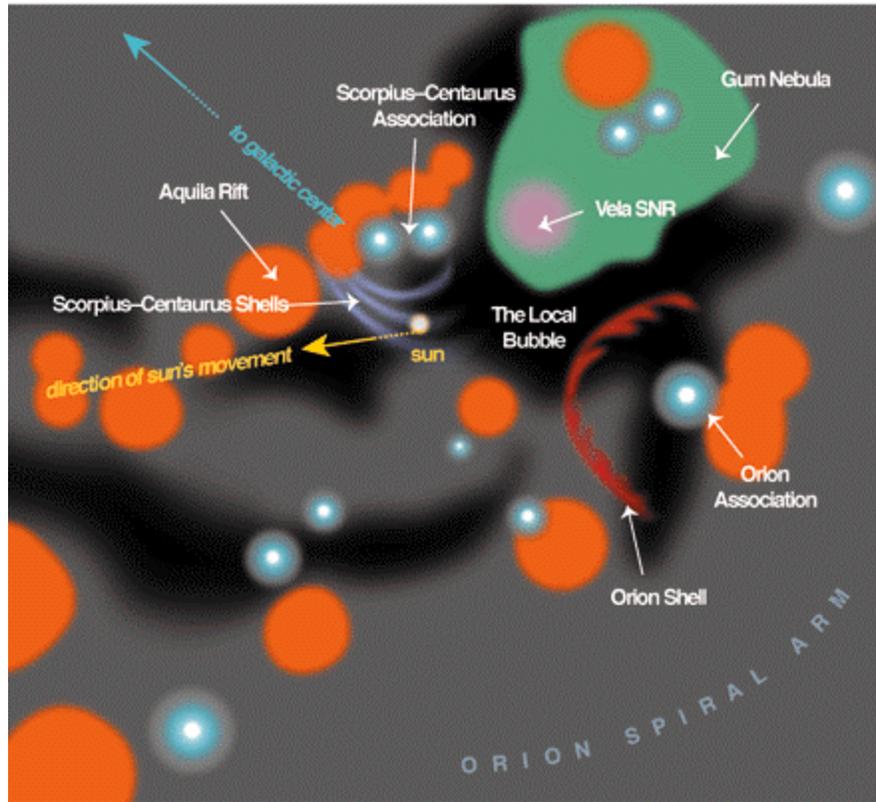
El viento solar a la altura de la Tierra tiene una velocidad del orden de 400 km/s pero a unas 150 UA es virtualmente detenido en la **heliopausa**. La region interior es la **heliosfera**, de forma similar a una gota o a la cabellera de un cometa, que como se mueve junto con el Sol a una velocidad superior a la que posee el sonido en el medio interestelar se supone debe existir una **onda de choque**. Las ondas de choque se forman cuando el medio es incapaz de transmitir perturbaciones mas rapido que la velocidad de la fuente.

Si bien el viento interestelar es desviado sobre la heliosfera la mayor parte de sus **atomos neutros** (H y He) logran penetrarla y fluir libremente hacia el sistema solar. A tal punto que la densidad de atomos neutros solares e interestelares se **equipara a la altura de la orbita de Jupiter**. El hidrogeno por ejemplo es visible en forma de una luminosidad producto de emision en la linea de Lyman alfa. El He en cambio logra penetrar a regiones mas proximas al Sol sin llegar a ionizarse y a tal punto que atomos neutros de He son gravitacionalmente desviados y enfocados por el Sol concentrandose en un **cono de He interestelar neutro** que es atravesado por la Tierra hacia fines de noviembre cada año.

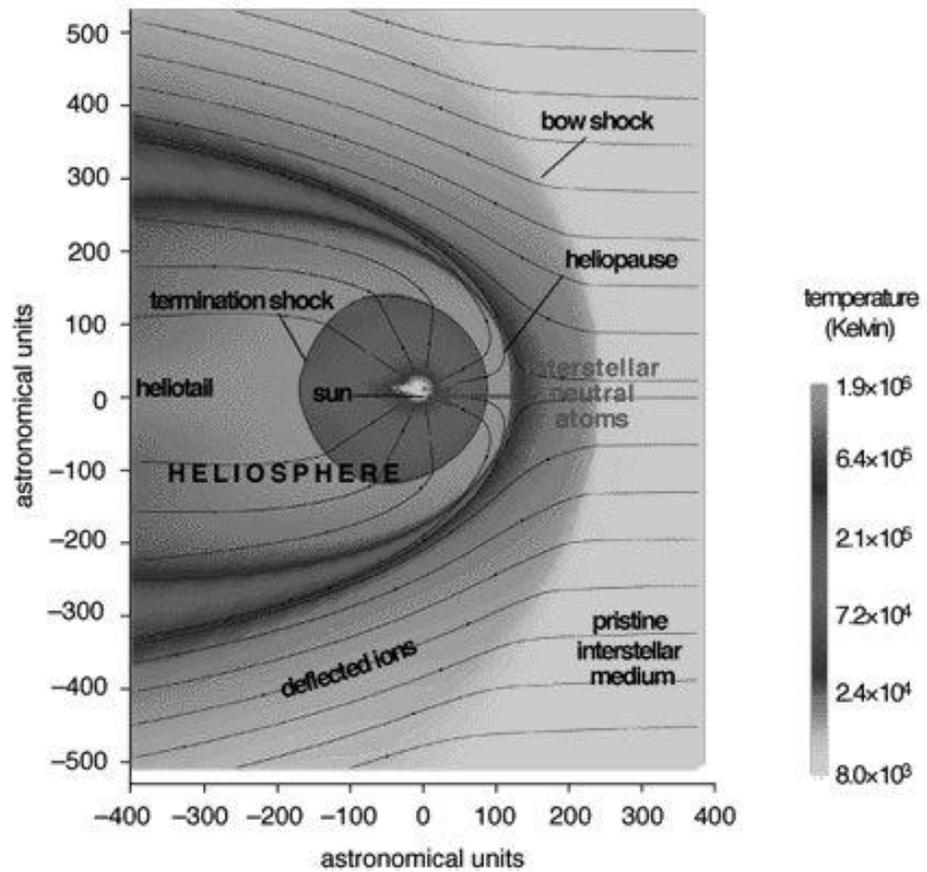
Cuando los atomos del viento interestelar se ionizan son inmediatamente arrastrados por el plasma del viento solar en direccion del frente de choque de la heliopausa (de donde provenian) alcanzando energias proximas a la de los rayos cosmicos. Algunos de estos logran volver nuevamente hacia el sistema solar y son observados en Tierra como **Rayos Cosmicos Anomalos**.

El viento interestelar transporta tambien granos de polvo de hasta 6 micrones que penetran la heliosfera siendo detectados por las sondas Ulysses y Galileo. Siguen una dinamica similar a los atomos de He, siendo enfocados gravitacionalmente en el mismo cono. Los granos mas pequeños estan cargados y por lo tanto son desviados por el campo de la heliopausa.

La nube interestelar local probablemente este constituida por muchas estructuras pequeñas de centenares o miles de UA de diametro con **alta densidad**. Si el Sol atraviesa estas regiones la dimension de la heliosfera cambia dramaticamente pudiendo reducirse a unas pocas UA. Parece ser que la heliosfera actua protegiendo a los planetas interiores de los agentes externos al sistema solar. Existen indicios de estos cambios en los hielos de la Antartida. Se han encontrado alli picos de concentacion de Berilio 10 en dos eventos hace 33000 y 60000 años que se supone fueron producidos por **incremento de rayos cosmicos** sobre la atmosfera terrestre. Estos incrementos pudieron ser causados por explosiones de supernovas o por pasaje a traves de un medio interestelar mas denso.



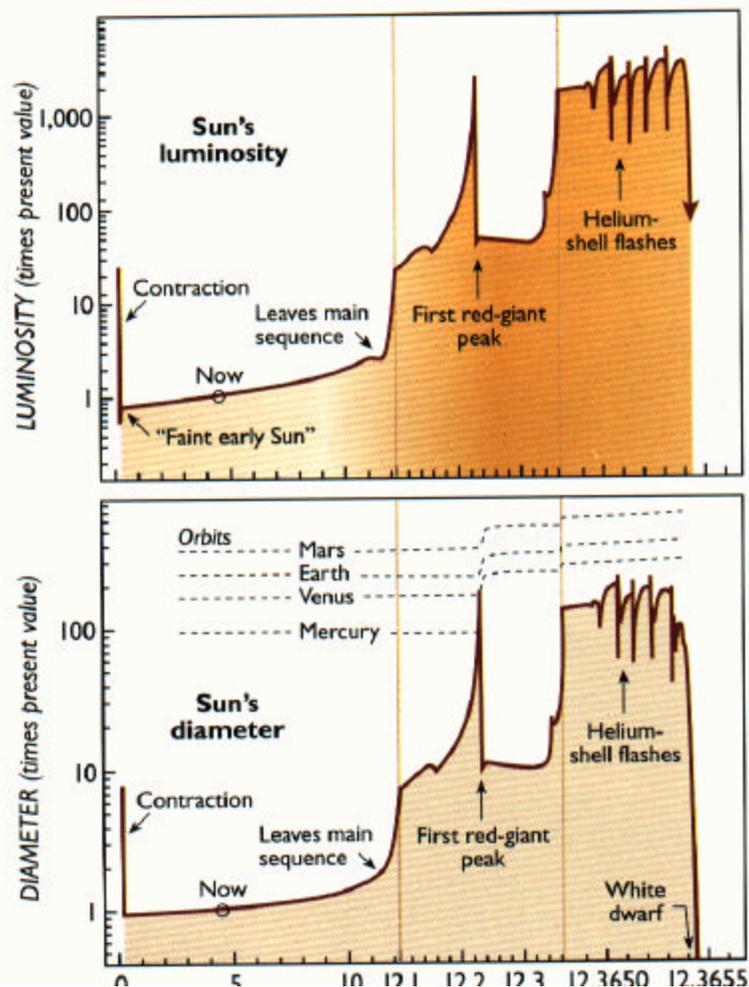
molecular clouds
  diffuse gas



## 5) DESTINO FINAL DE LA TIERRA Y EL SOL

Tabare Gallardo, feb 2002.

No hay aún una única respuesta sobre el destino final del sistema solar debido a la incertidumbre en las etapas finales del Sol. En la etapa de gigante roja el sol incrementara dramaticamente su radio y luminosidad mientras que su temperatura efectiva decrecera sustancialmente. Los valores seran extremos al final de la etapa de gigante roja y difieren según diferentes modelos propuestos pero seran del orden de 2100 veces la luminosidad actual y 150 veces el radio actual. La temperatura efectiva (relacionada con la luminosidad) descendera a 3200 K. Esto ocurrira dentro de 7 u 8 mil millones de años. La evolucion de los planetas proximos al Sol se vera afectada por la **variacion de la distancia de estos al Sol**. Debido a la **perdida de masa del Sol** en forma de viento en su etapa de gigante los planetas tienden a espiralar hacia afuera. Por otro lado las capas exteriores de la atmosfera solar actuan **frenando** el movimiento orbital de los planetas mas proximos obligandolos a espiralar hacia el centro solar. Asimismo las **fuerzas de mareas** de los planetas sobre las capas exteriores del Sol (que giran mas lentamente que el nucleo) produciran un aumento de su rotacion y un frenado del movimiento orbital planetario espiralado hacia el Sol. Esto es una **transferencia de momento** angular exactamente contraria a la que ocurre actualmente en el sistema Tierra-Luna. Con todas estas consideraciones es posible a traves de modelos matematicos estimar la evolucion orbital de los planetas en relacion al variable radio solar. En general los modelos indican que **los 3 planetas mas interiores seran absorbidos por el Sol** (si es que no fueron antes expulsados debido a su dinamica caotica según Laskar). Si el planeta llega a una region con temperatura tal que la suma total de la energia cinetica de sus particulas es comparable a su energia gravitacional **se evaporara**. Para el caso de la Tierra se requieren 300000 K. Mercurio y Venus seran evaporados. En algunos modelos la Tierra no llega a evaporarse aunque lo mas probable es que tambien sea destruida. Marte sobrevivira y debido a la perdida de masa del Sol (se estima que quedara con 55% de su masa actual) los restantes planetas incrementaran el tamaño de sus orbitas creciendo el conjunto del sistema en un 80%.



Bibliografía:

J. Kelly Beatty y otros, "The new Solar System".

Priscilla Frisch, "The galactic environment of the Sun", American Scientist, 2000.

Kennet Lang, "The Sun from space".

Judith Lean, "The Sun's variable radiation and its relevance for Earth", Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1997.

Graham Woan, "The Cambridge handbook of physics formulas".

Martin Zombeck, "Handbook of space astronomy and astrophysics".