

# TEMA 7: Sol y magnetosferas

- \* Estructura del Sol.
- \* Actividad solar. Manchas, protuberancias, eyecciones de masa coronal, fulguraciones.
- \* Campo magnético del Sol. Causas de la actividad solar.
- \* El ciclo undecenal.
- \* Radioexplosiones solares.
- \* Neutrinos solares. El problema de los “neutrinos faltantes”.
- \* Viento solar. Interacción con los campos magnéticos planetarios.
- \* Clima espacial.
- \* El futuro del Sol.

# El Sol: Propiedades generales



DATOS GENERALES:

$$M_{\odot} = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$$

$$R_{\odot} = 6.96 \times 10^5 \text{ km}$$

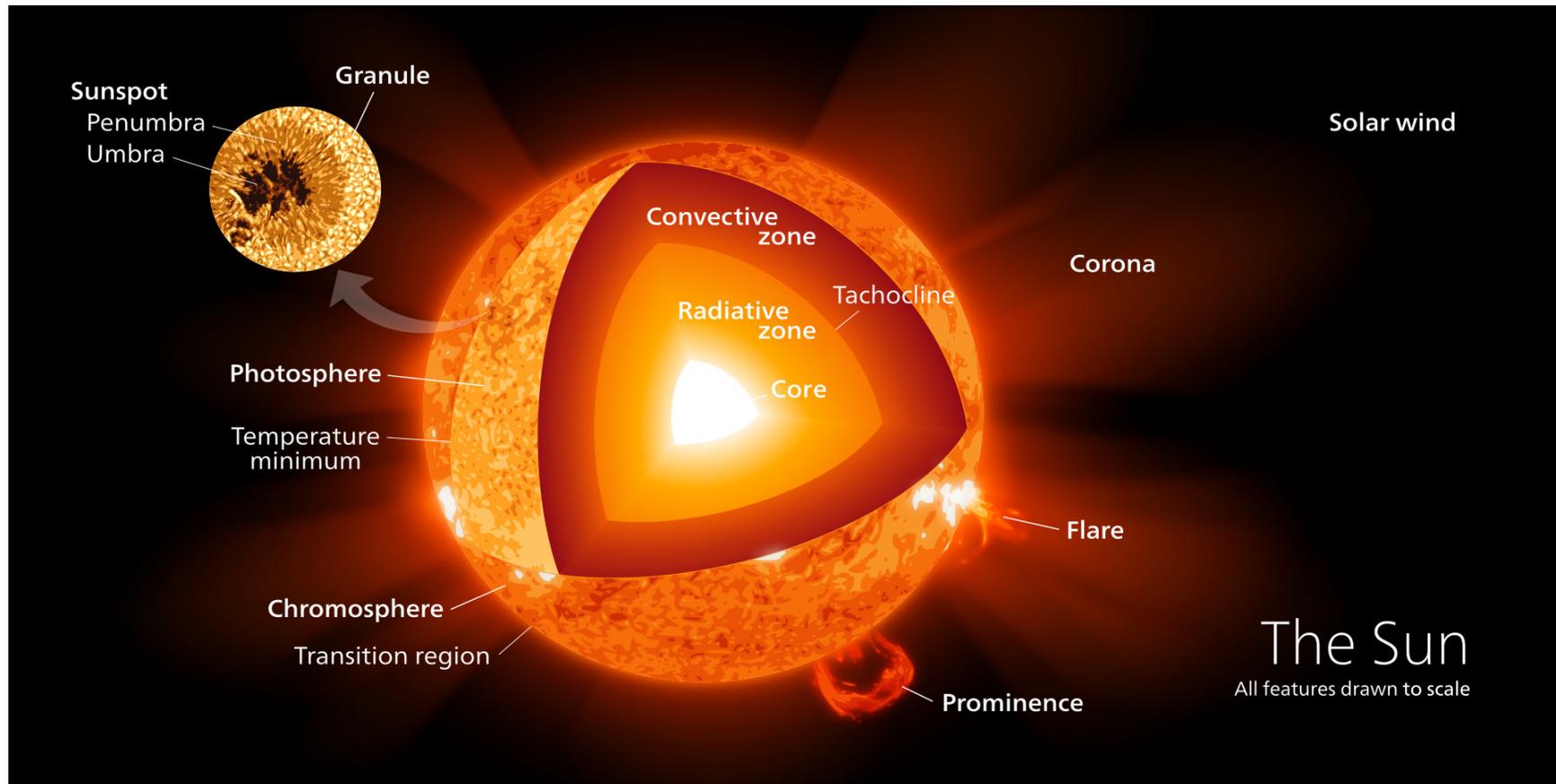
$$\rho = 1.4 \text{ g cm}^{-3}$$

$$T_{ef} = 5785 \text{ K}$$

$$T_c = 1.5 \times 10^7 \text{ K}$$

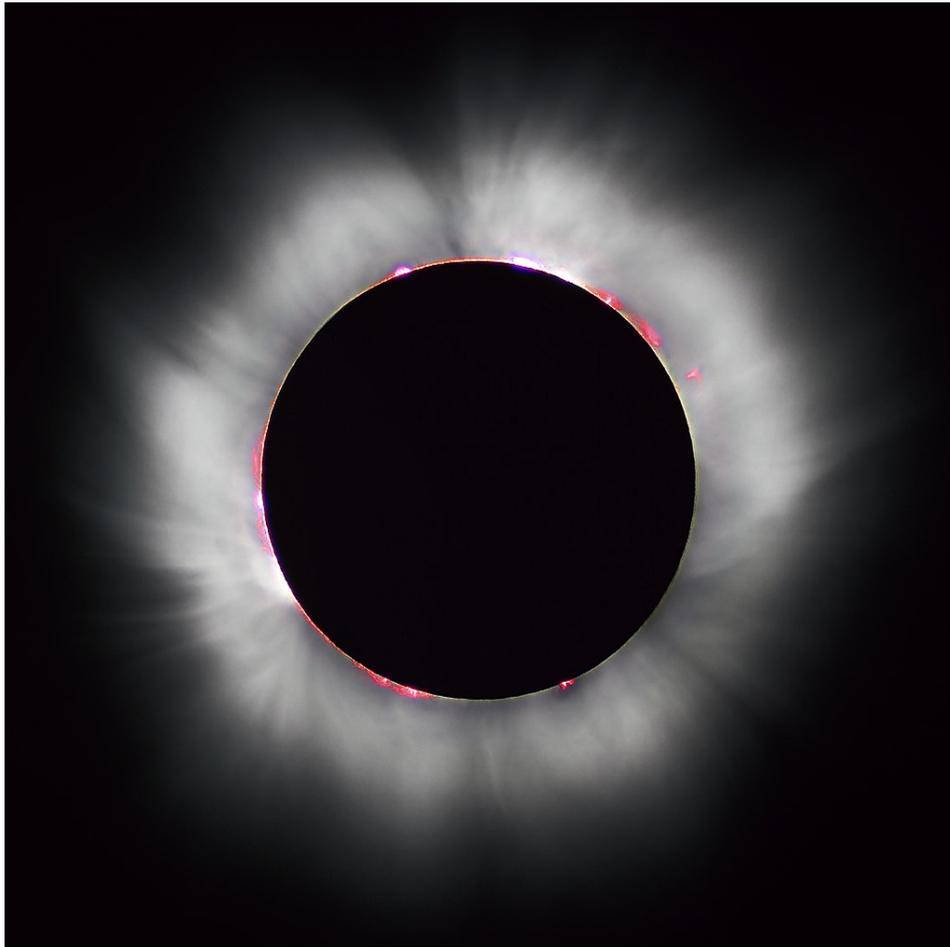
En luz visible es notorio el fenómeno del *oscurecimiento del limbo*, un efecto geométrico debido a que la radiación en el visible proviene de una capa superficial (fotosfera) a la misma profundidad óptica  $\tau = 2/3$ . El lugar geométrico de igual  $\tau$  no coincide con el lugar de igual temperatura.

# Estructura interna



**NUCLEO:** Abarca un 20-25% del radio del Sol. Es donde se genera la energía solar por fusión termonuclear (ciclo protón-protón) donde el hidrógeno se va convirtiendo en helio.

**ZONA RADIATIVA:** Es la zona en donde la energía se transfiere por radiación (fotones). Se extiende hasta un 70% del radio solar.



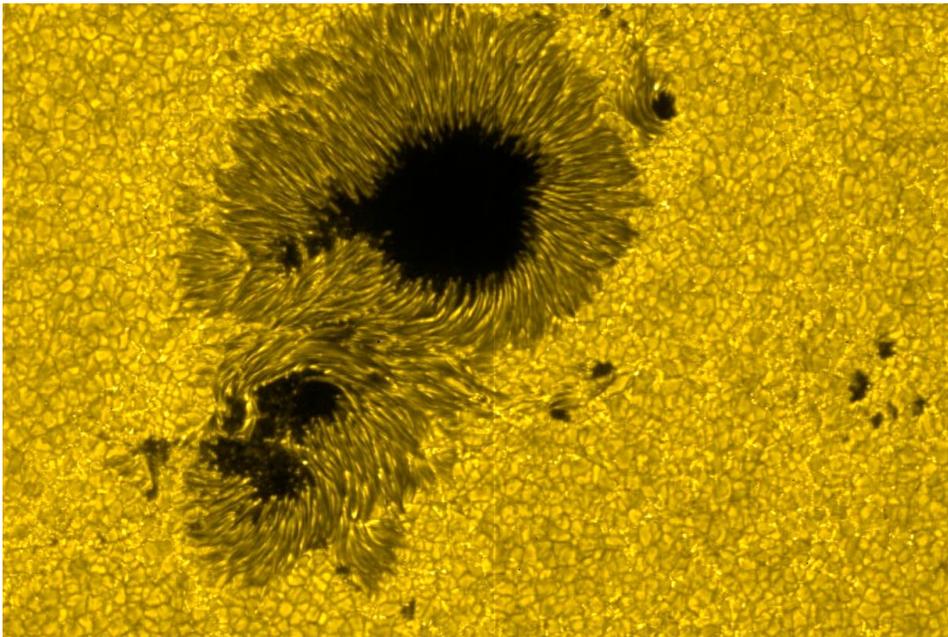
**ZONA CONVECTIVA:** Es la zona más externa que se extiende desde la zona radiativa hasta la superficie. El material es lo suficientemente frío y poco denso para que se genere convección que transporta el calor.

**FOTOSFERA:** Es la fina capa exterior de donde procede la mayor parte de la radiación que recibimos.

**ATMOSFERA:** Es el halo gaseoso que rodea al Sol. Comprende la cromosfera, la región de transición, corona y heliosfera.

## Campo magnético y actividad solar

El Sol posee un campo magnético general de 1-2 Gauss, pero pueden haber campos localizados en las manchas con intensidades de unos 3000 Gauss, y de unos 10-100 Gauss en las denominadas prominencias. Los campos magnéticos solares son dínamo autosustentables en los que movimientos convectivos y la rotación diferencial en el interior del Sol de fluidos eléctricamente conductores (plasmas) convierten la energía cinética del movimiento en energía eléctrica y magnética.

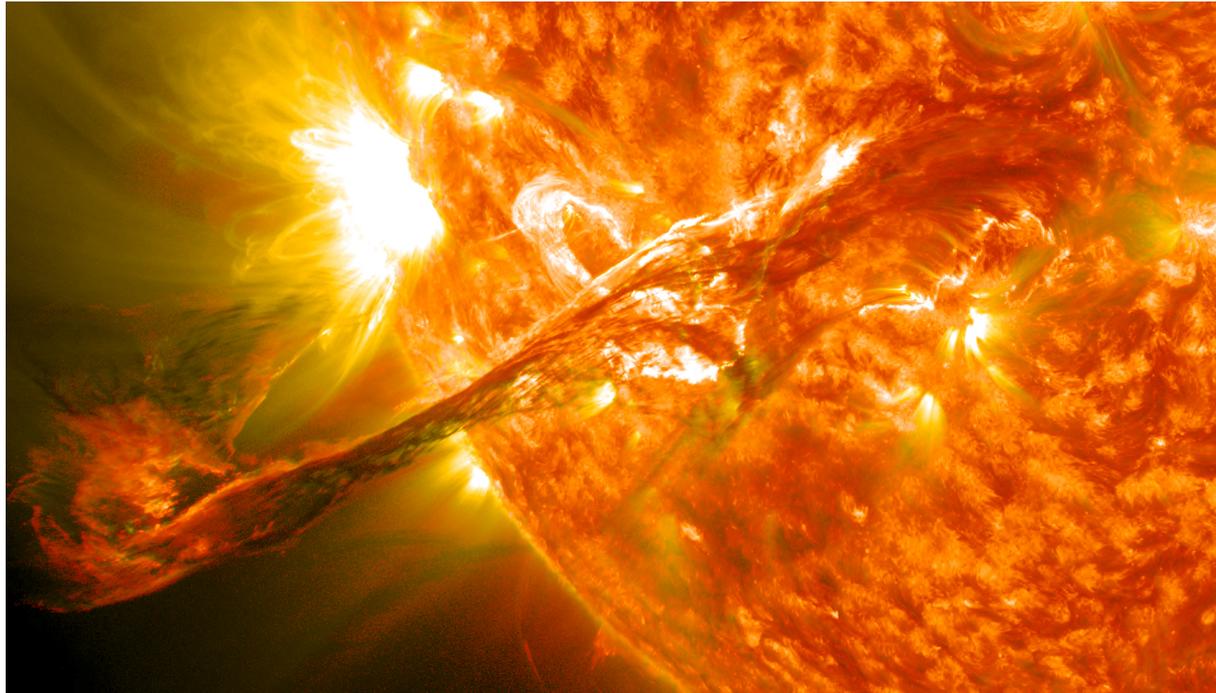


**GRANULACIONES:** Las columnas convectivas de gases ascendentes calientes generan el aspecto granular de la superficie solar.

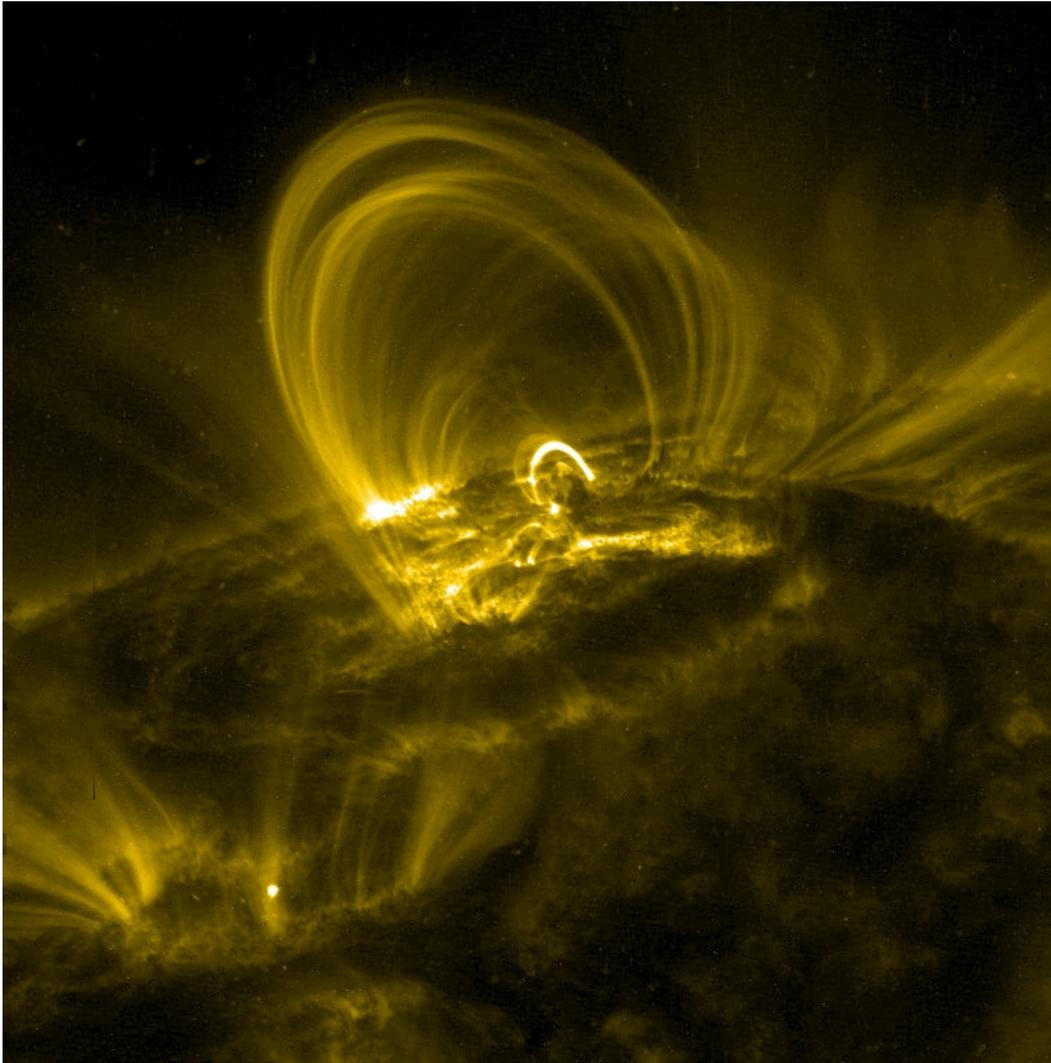
**MANCHAS SOLARES:** Corresponden a zonas de concentración de campos magnéticos que inhiben la convección, por lo tanto son zonas más frías de la fotosfera (temperaturas  $\sim 3800$  K). Usualmente aparecen en pares de polaridad magnética opuesta.

## Actividad asociada a las manchas solares

Las manchas solares están acompañadas por *protuberancias*, *eyecciones de masa coronal*, *fulguraciones* ("flares") y *eventos de reconexión magnética* en los cuales la topología del campo magnético es reordenada y la energía magnética se convierte en energía cinética térmica y aceleración de partículas.



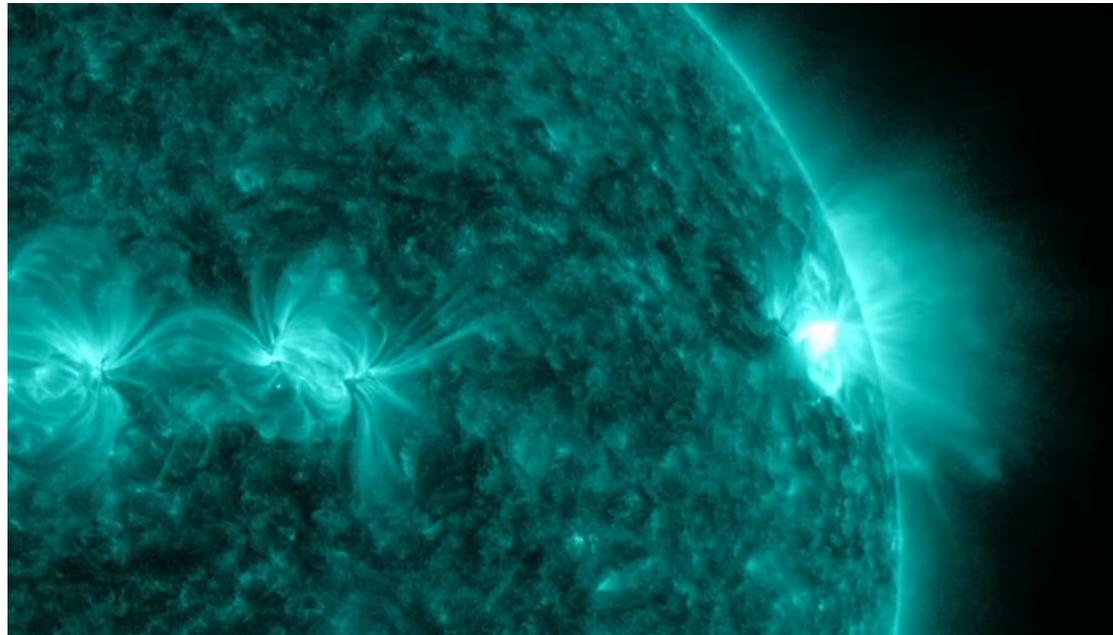
Protuberancia solar observada en agosto 2012 desde el satélite *Solar Dynamics Observatory*.



LAZO CORONAL: Es otro ejemplo de prominencia en forma de arco que conecta áreas de polaridad magnética opuesta en la fotosfera.

# Fulguraciones solares

Una fulguración es un repentino flash muy brillante usualmente próximo a un grupo de manchas. Pueden involucrar energías de entre  $10^{20}$  Joules hasta  $10^{25}$  Joules. Las fulguraciones están potenciadas por la liberación repentina de energía magnética almacenada en las manchas (escala de tiempo de minutos a decenas de minutos). La energía es liberada bajo forma de energía electromagnética a lo largo de todo el espectro y electrones, protones e iones más pesados que son acelerados hasta velocidades cercanas a la de la luz.



Fulguración solar masiva observada desde el satélite *Solar Dynamics Observatory* (SDO) el 9/agosto/2011.

## El Sol a través de filtros

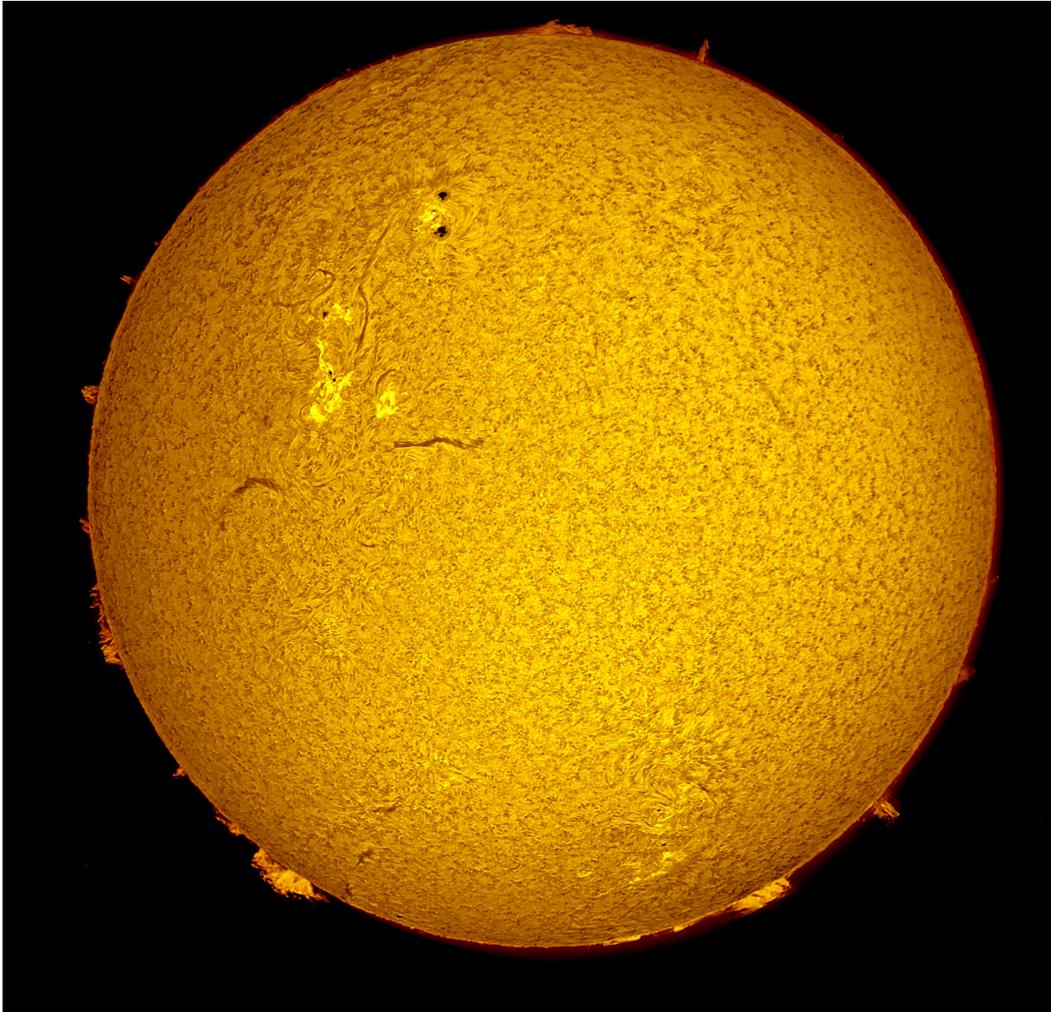


Imagen en  $H_{\alpha}$  ( $\lambda = 6563 \text{ \AA}$ ) tomada en el Observatorio Astrofísico de Canarias. Se pueden observar con gran detalle filamentos (protuberancias proyectadas sobre el disco solar) y *playas* que son zonas brillantes en la cromosfera, asociadas a *fáculas* (zonas brillantes en la fotosfera) y manchas solares. Los filamentos aparecen oscuros porque están constituidos por gas más frío que el de la fotosfera.

La densidad de energía  $u$  asociada a un campo magnético de intensidad  $B$  esta dada por:

$$u = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_o}$$

donde  $\mu_o$  es la permeabilidad. En el sistema MKS vale:  $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ .

Si esa energía almacenada en el campo magnético se liberara repentinamente como energía cinética, se tendría un reservorio de energía capaz de explicar fenómenos violentos como las fulguraciones.

**EJEMPLO:** Campo magnético asociado a una mancha  $B = 3000 \text{ Gauss} = 0.3 \text{ Tesla}$ . Una mancha puede ocupar un volumen similar al de la Tierra  $V \sim 1.1 \times 10^{21} \text{ m}^3$ . Tenemos:

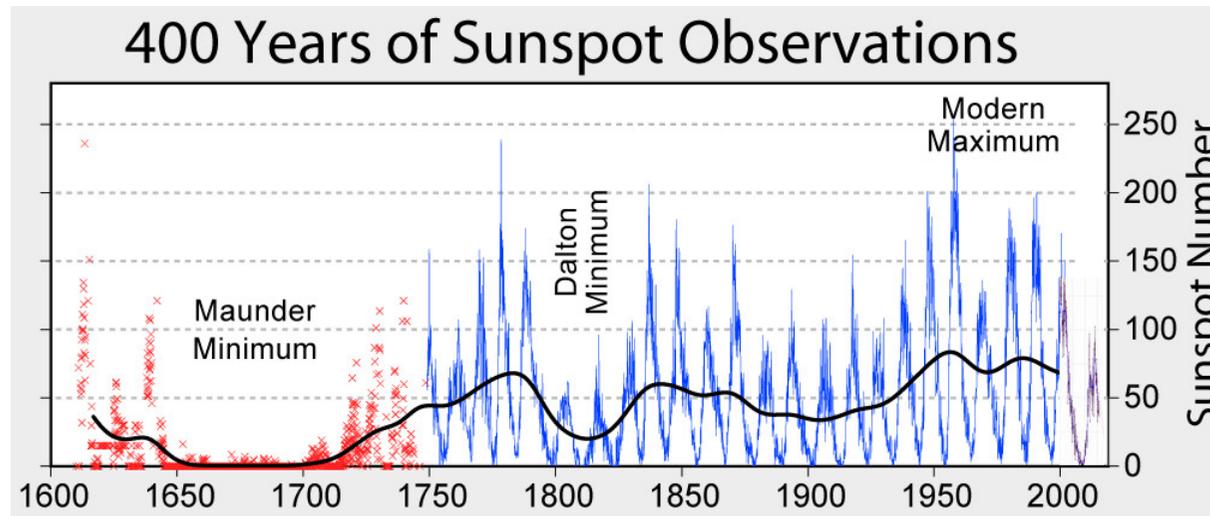
$$u = \frac{1}{2} \left( \frac{0.3^2}{4\pi \times 10^{-7}} \right) \simeq 3.58 \times 10^4 \text{ Joule m}^{-3}$$

La energía total liberada es:

$$E = uV = 3.58 \times 10^4 \times 1.1 \times 10^{21} = 3.93 \times 10^{25} \text{ Joules}$$

## El ciclo undecenal

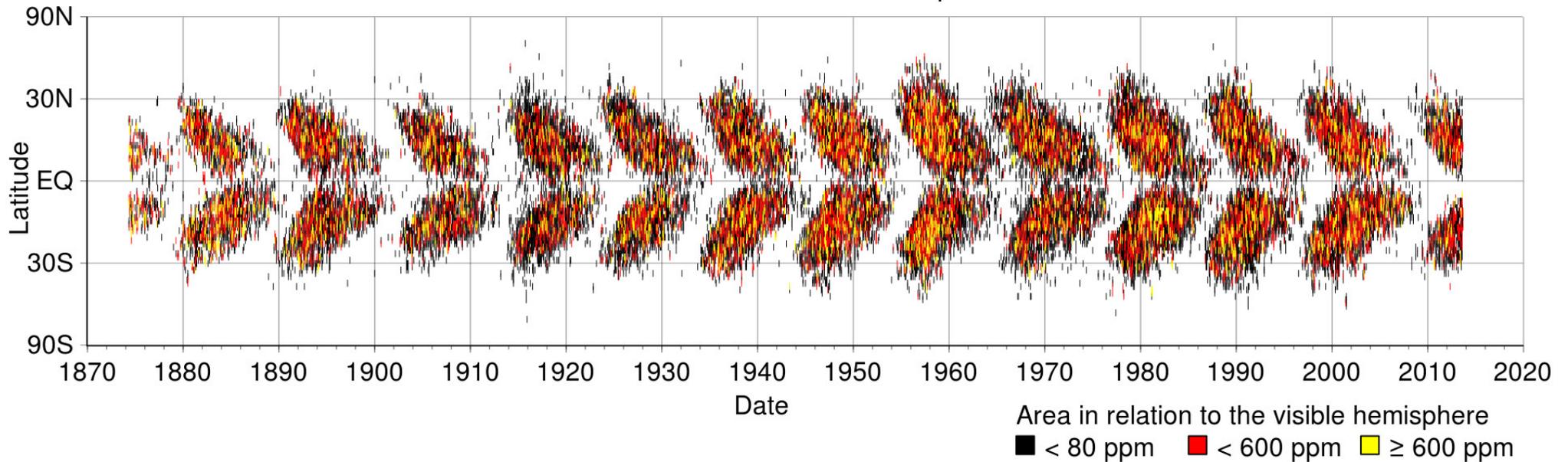
La frecuencia de manchas solares y actividad relacionada sigue un ciclo de 11 años relacionada con cambios oscilatorios de energía entre los campos magnéticos toroidal y poloidal del Sol. Cuando el campo toroidal adquiere su máxima intensidad, afloran a la superficie intensos campos magnéticos acompañando el movimiento convectivo ascendente de gases. El campo magnético del Sol cambia su polaridad cada 11 años a su pico de actividad.



Ciclo de manchas solares. No se mantiene inalterado a través del tiempo. Se puede distinguir el mínimo de Maunder entre 1645 y 1715 en que las manchas prácticamente desaparecieron. Es interesante que este período coincidió con una pequeña edad de hielo. La causa es controversial y ésta pudo deberse a una intensa actividad volcánica.

# Diagrama mariposa

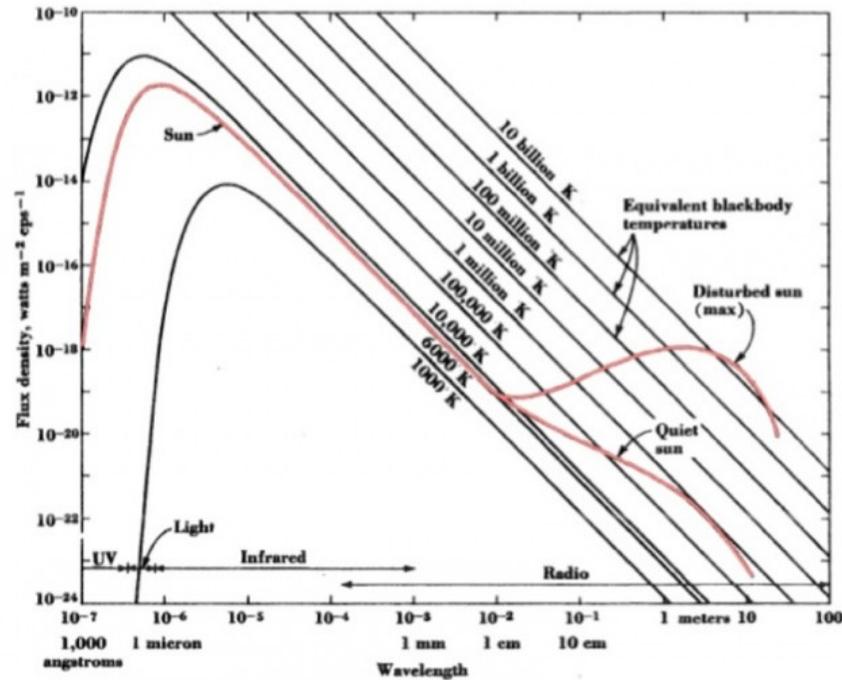
Position and area of sunspots



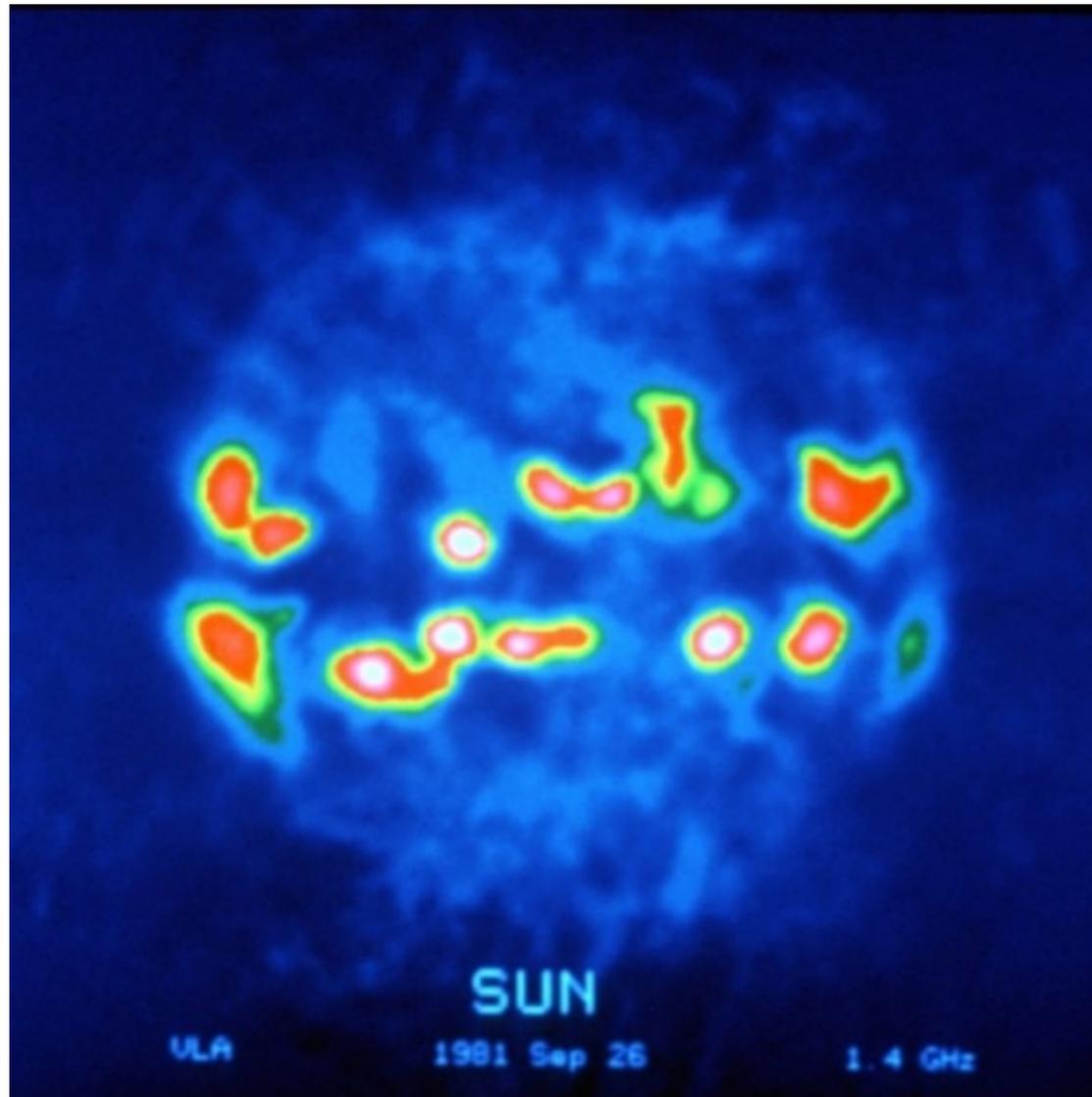
Al comienzo de cada ciclo, las manchas aparecen a latitudes medias, y entonces se van desplazando hacia el ecuador hasta alcanzar el mínimo. Notemos que la vida de las manchas es muy breve (de algunos días a unos pocos meses) lo que significa que en cada ciclo las manchas se renuevan muchas veces.

# Radioemisiones solares

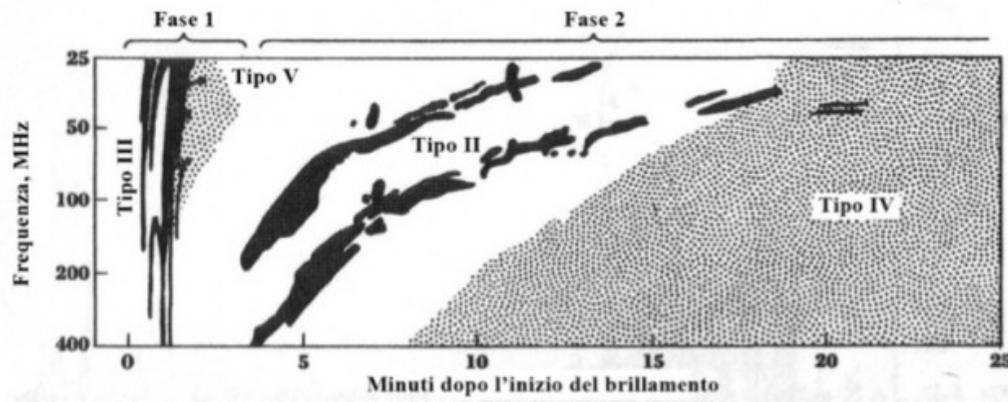
El Sol es una de las más poderosas radiofuentes en el cielo. Las radioemisiones se generan más bien en la cromosfera y la corona. La mayoría de esta radiación es no térmica generada por el mecanismo de radiación sincrotrón a partir del movimiento de electrones acelerados en el campo magnético solar.



Curvas Plankianas de radiación térmica a las que se le superpone la radiación no térmica del Sol para  $\lambda > 1$  cm. Se consideran 2 casos: el "Sol tranquilo" (mínimo de actividad) y "Sol perturbado" (máximo de actividad).



Radioimagen del Sol en 4 GHz (7.49 cm) obtenida con el *Very Large Array*. Las zonas brillantes son parte de la corona, cercanas pero más allá de las manchas solares.



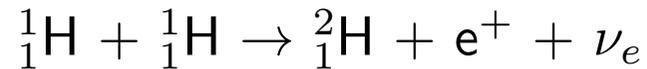
Espectro de radio de un evento intenso asociado a una fulguración. La radioemisión se clasifica de acuerdo a sus características en el espacio de frecuencias y lapsos de tiempo con respecto al inicio del fenómeno.



Radiotelescopio interferométrico constituido por 16 antenas tipo yagi ubicado en el Aeropuerto Nacional de Carrasco. Se lo utilizó para estudiar radioexplosiones solares, en particular las Tipo IV (ca. 1965).

## Neutrinos solares

Como subproducto de las reacciones de fusión termonuclear en el núcleo del Sol, se libera un flujo enorme de neutrinos. Como ejemplo de reacción que produce neutrinos tenemos la primera etapa de ciclo protón-protón que lleva a la trasmutación de hidrógeno en helio:



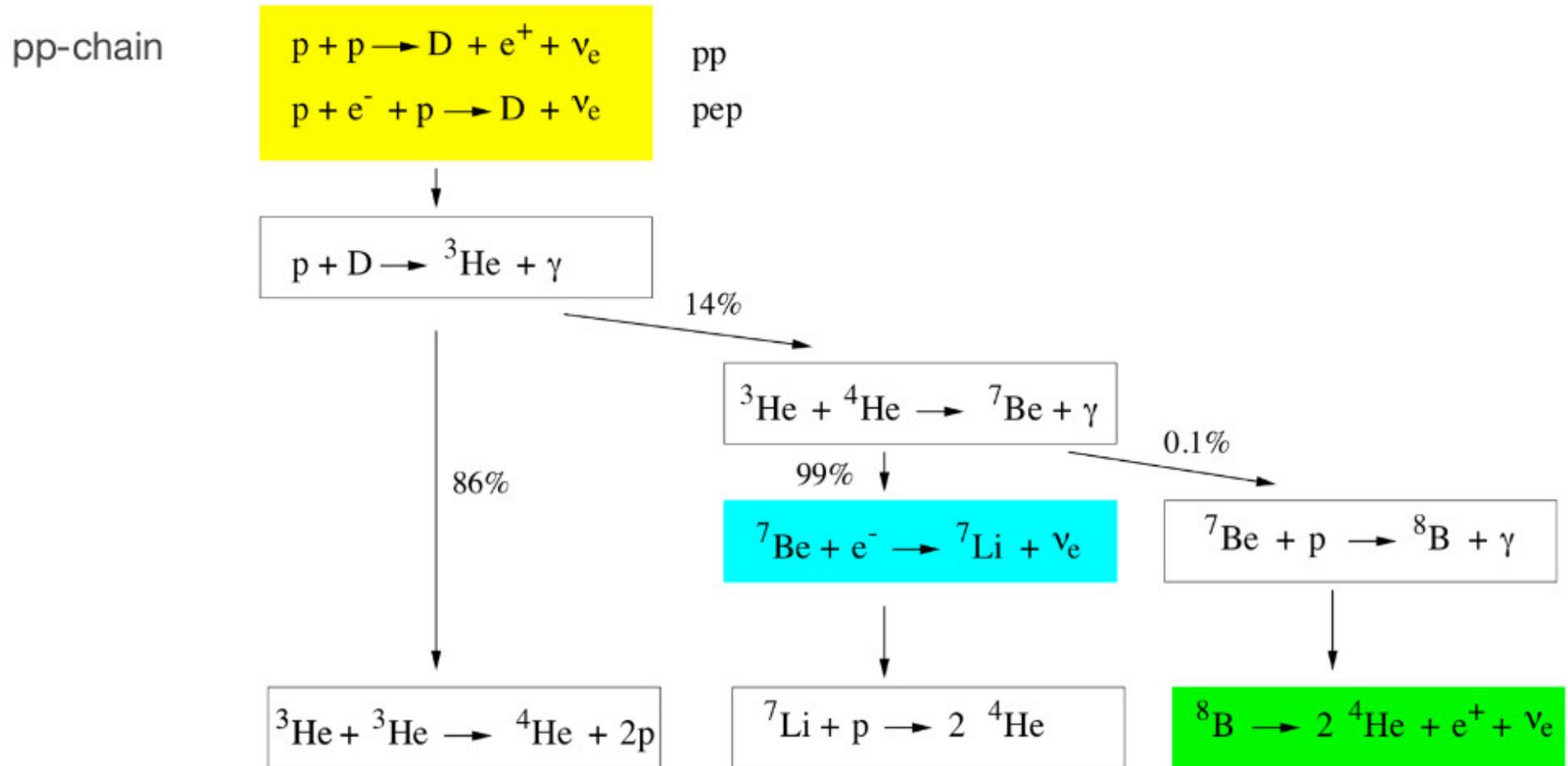
donde  $\nu_e$  es un tipo de neutrino denominado electrónico.

La cadena de reacciones que termina en un núcleo atómico de helio libera 26.73 MeV de los cuales el 2% de esa energía se la llevan los 2 neutrinos producidos y el 98% se va como fotones gamma.

Hay varias ramificaciones en la cadena que transforma 4 núcleos de hidrógeno en uno de helio y en todas ellas se liberan neutrinos con distintas energías.

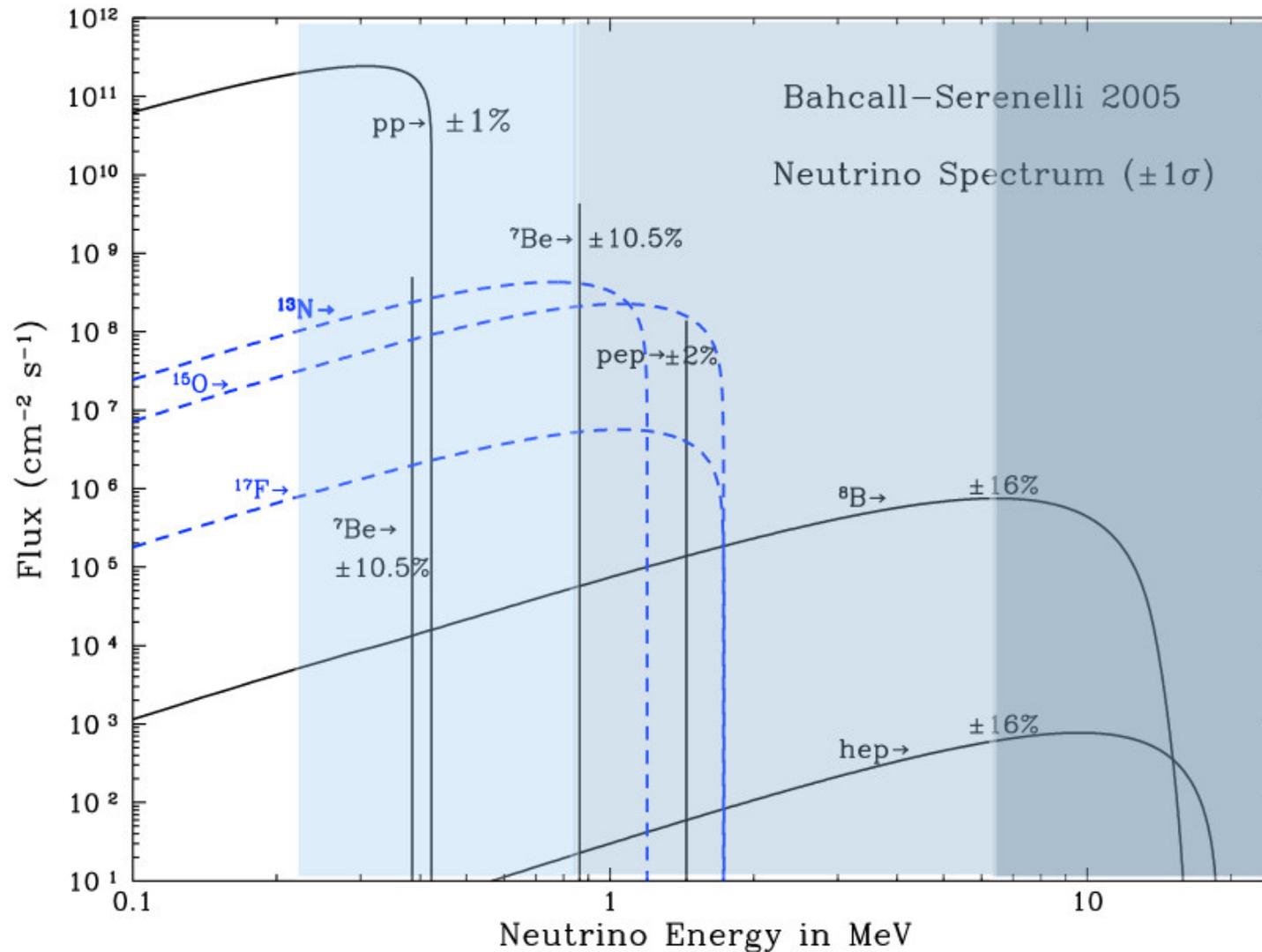
La detección de neutrinos solares nos permitiría estudiar el interior del Sol y los detalles de las reacciones termonucleares que generan su energía. Como los neutrinos prácticamente no interactúan con la materia, pueden atravesar el interior del Sol sin ser absorbidos.

# Producción de neutrinos en distintas reacciones termonucleares



Distantas ramificaciones en ciclo protón-protón que producen neutrinos con diferentes energías.

# Espectro de energías de los neutrinos solares



La mayoría de los neutrinos solares tienen energías  $< 0.3$  MeV.

## Estimación del flujo de neutrinos que llega a la Tierra:

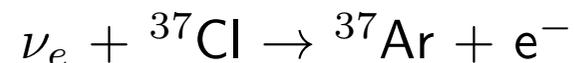
La luminosidad solar es  $L_{\odot} = 4 \times 10^{26}$  Joules/s de los cuales 2% se va en neutrinos. Asumamos que cada neutrino tiene una energía  $E_{\nu} = 0.26$  MeV =  $4.2 \times 10^{-14}$  Joules. Por lo tanto tasa de neutrinos liberada por el Sol es:

$$\frac{4 \times 10^{26} \times 0.02}{4.2 \times 10^{-14}} \simeq 2 \times 10^{38} \text{ neutrinos/s}$$

De ese tasa de neutrinos emitidos por el Sol en todas direcciones la Tierra, a una distancia  $r = 1.5 \times 10^{11}$  m, interceptará un flujo:

$$\frac{2 \times 10^{38}}{4\pi r^2} = 7.1 \times 10^{14} \text{ neutrinos/m}^2/\text{s}$$

La pregunta es cómo se puede detectar este flujo de neutrinos si interactúan tan poco con la materia. El primer experimento diseñado tenía en cuenta que se puede producir la rara reacción:

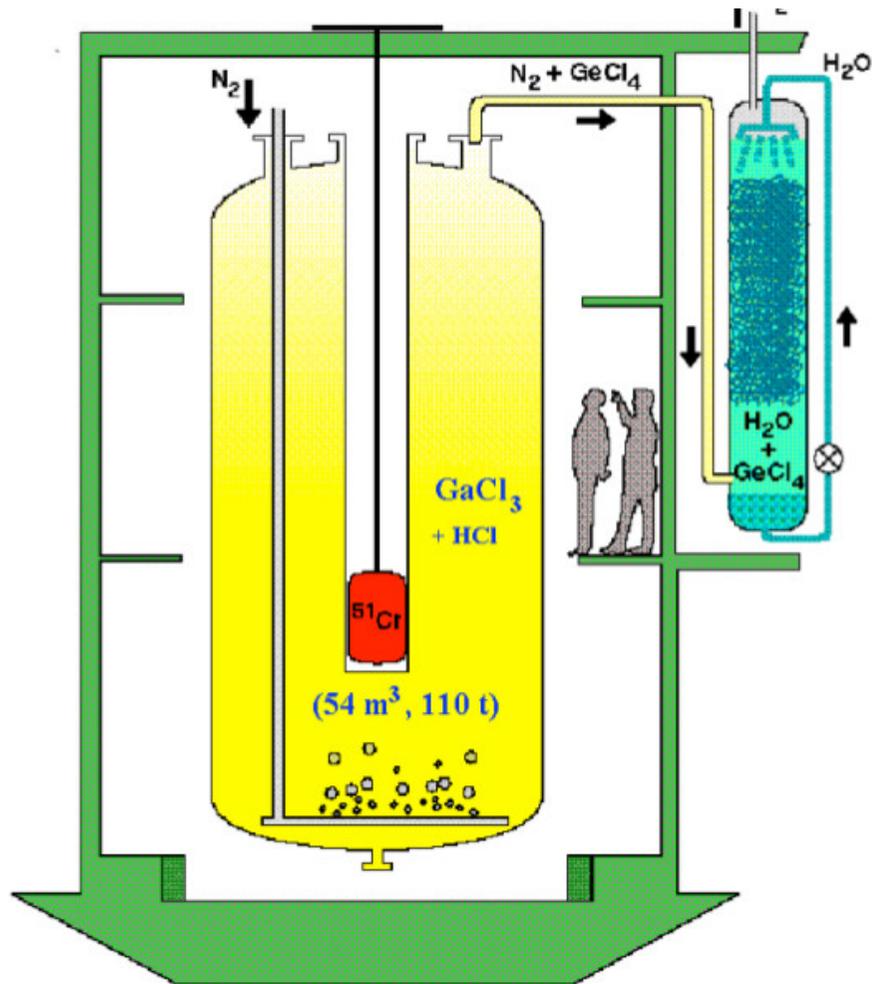


El mayor problema es que esta reacción sólo se puede dar para neutrinos con energías  $> 0.814$  MeV que son la minoría entre los neutrinos solares.

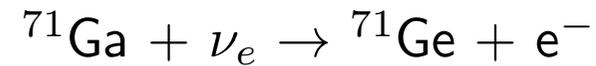


Primer detector diseñado para medir el flujo de neutrinos provenientes del Sol. Estaba constituido por un tanque conteniendo 380000 litros de tetracloroetileno ( $C_2Cl_4$ ) localizado en la mina Homestake a aproximadamente 1.5 km de profundidad. La interacción de neutrinos solares con átomos de cloro producían isótopos de  $^{37}Ar$  que eran posteriormente recogidos. La localización en la mina le proporcionaba protección contra los rayos cósmicos que podrían interactuar con el cloro produciendo átomos de  $^{37}Ar$  espúreos. El experimento fue conducido por Raymond Davis, Jr. Estos resultados mostraron por primera vez que el flujo de neutrinos solares es menor que el predicho.

## Otros detectores para neutrinos de menor energía



La mayoría de neutrinos solares tienen energías del orden de 0.26 MeV. Se precisaba entonces otro elemento que pudiera detectar neutrinos de menor energía. Ese elemento es el galio a través de la reacción:



Esta reacción puede medir neutrinos con un umbral de energía de 0.233 MeV.

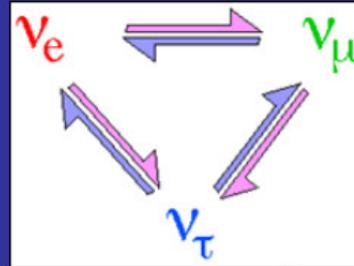
Este experimento se materializó en el Baksan Neutrino Observatory en el Caucaso, Rusia, que emplea un tanque con 50 toneladas de GaCl<sub>3</sub> localizado a 2.1 km de profundidad. La reacción produce un isótopo de germanio radioactivo que se recoge.

# El problema de los neutrinos faltantes

## Neutrinos

### The Solar Neutrino Problem

But if neutrinos have mass, they could change flavour. Thus, "missing" solar neutrinos could be electron neutrinos which changed into other types along the way to Earth and therefore escaped detection.



Sun makes  
electron neutrinos

**Non zero  
mass case**

Earth sees 33%  
electron neutrinos

Todos los experimentos han mostrado que el número de neutrinos electrónicos que produce el Sol es menor que el predicho teóricamente, en lo que se conoce como el "problema de los neutrinos faltantes". Hoy se explica sobre la base de que los neutrinos tienen algo de masa que los lleva a cambiar su "sabor" durante su trayecto a la Tierra pasando una fracción de ellos a neutrinos tau o neutrinos muon que no son detectados por los instrumentos utilizados.

## Corona y viento solar

La corona solar se extiende millones de km en el espacio exterior y se puede observar durante un eclipse total de Sol o con un coronógrafo. La materia está en forma de plasma (altamente ionizada) a temperaturas muy altas (algunos millones de Kelvin) y muy bajas densidades (del orden de  $10^{15}$  partículas/m<sup>3</sup>). El descubrimiento de la alta ionización de la corona se dio a través de la identificación de las líneas de emisión del Fe IX y Ca XIV en el espectro solar, al principio atribuidas a un elemento desconocido denominado "coronium".

**El problema del calentamiento coronal:** Se reduce a la siguiente pregunta: ¿Si la temperatura de la fotosfera es de unos 6000 K, cómo puede la temperatura de la corona elevarse millones de grados? Se han propuesto varias teorías, pero dos aparecen como más aceptadas: (1) calentamiento por ondas magnetohidrodinámicas, (2) ocurrencia de nanofulguraciones por la conversión de energía magnética en cinética.

Desde la corona se libera una corriente de partículas cargadas, constituida fundamentalmente por electrones, protones y partículas alfa, con energías cinéticas entre 0.5 y 10 keV. Este flujo de partículas se denomina *viento solar* y se desplaza arrastrando consigo líneas de fuerza del campo magnético solar.

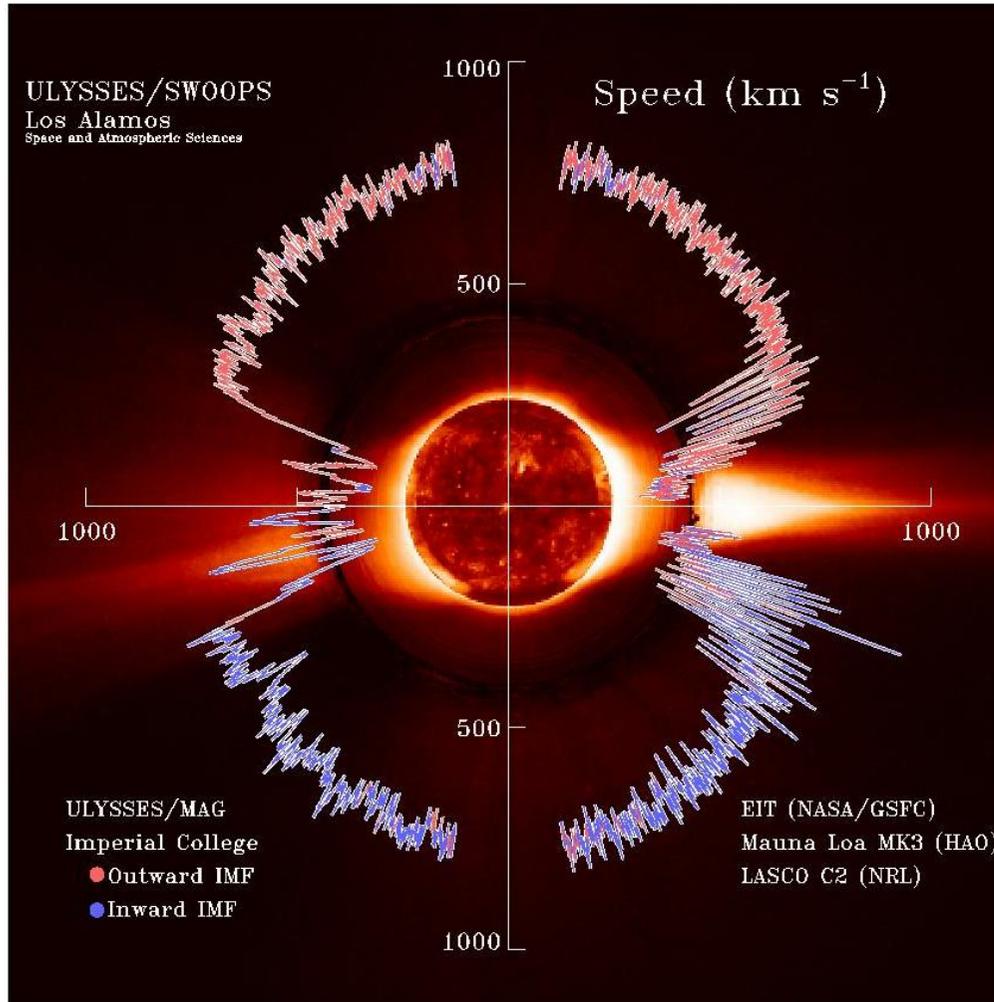
# Aceleración de partículas

Aun a temperaturas de algunos millones de K, el viento solar no podría escapar del Sol, cuya velocidad de escape en la superficie es 618 km/s. Para una corona termalizada la velocidad cuadrática media es:

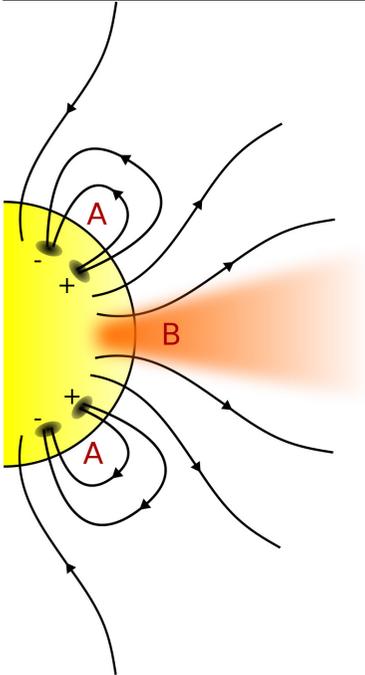
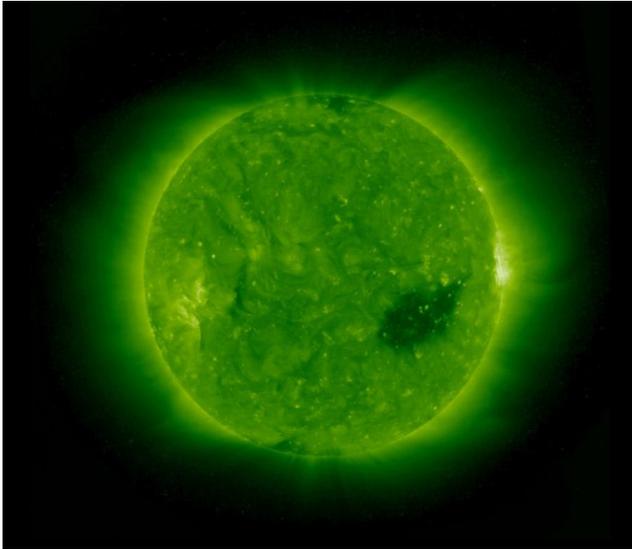
$$v = \left( \frac{3kT}{m} \right)^{1/2}$$

Si adoptamos  $T = 2 \times 10^6$  K y  $m = 1.67 \times 10^{-24}$  g, obtenemos  $v = 220$  km/s, bien por debajo de la velocidad de escape.

La sonda *Ulysses* midió velocidades de hasta 750 km/s en las zonas polares y unos 400 km/s en las zonas ecuatoriales. Interacciones con líneas de fuerza del campo magnético aceleran las partículas.



# Agujeros coronales



Son áreas donde la corona solar es más fría y por ende, más oscura, que contiene plasma de menor densidad. En estos túneles de líneas de fuerza magnéticas las partículas escapan a una tasa muy alta, dejando atrás un embudo con una baja densidad de partículas con velocidades menores.

## Viento solar y pérdida de masa del Sol

A la distancia de la Tierra, durante el período de poca actividad solar, el viento solar contiene entre 1-10 protones por  $\text{cm}^3$  con velocidades de entre 350-700 km/s. A partir de este dato observacional podemos estimar cuánta materia pierde el Sol por segundo:

$$\dot{M} = 4\pi \times r^2 \times n \times m_H \times v$$

si adoptamos:  $r = 1.5 \times 10^{13}$  cm,  $n = 5$  protones/ $\text{cm}^3$ ,  $m_H = 1.67 \times 10^{-24}$  g,  $v = 500$  km/s, nos queda:

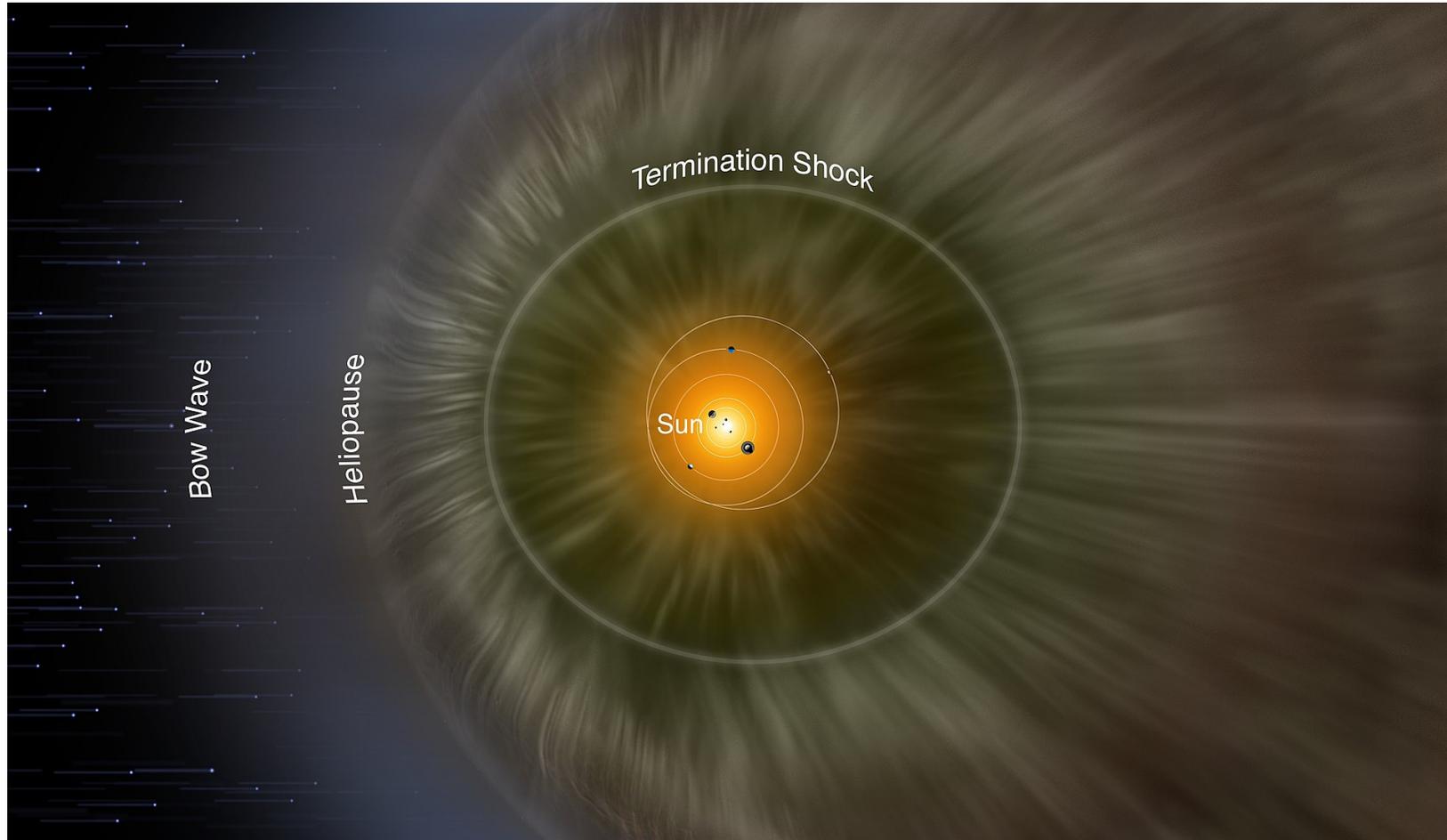
$$\dot{M} = 1.2 \times 10^{12} \text{ g/s}$$

A cabo de 1 año el Sol perderá una cantidad de masa:

$$1.2 \times 10^{12} \text{ g/s} \times 3.156 \times 10^7 \text{ s} = 3.8 \times 10^{19} \text{ g/año} = 1.9 \times 10^{-14} M_{\odot}/\text{año}$$

O sea, una pérdida de masa de  $1.9 \times 10^{-14} \times 4.6 \times 10^9 = 8.7 \times 10^{-5} M_{\odot}$  durante toda la vida del sistema solar. Esto representa apenas 0.01% de la masa total. Hay tipos de estrellas en que la pérdida de masa a través del viento solar es mucho más significativa.

# Heliopausa



La heliopausa es el límite donde el viento solar es detenido por el medio interestelar, en otras palabras es el límite en el cual las presiones del viento solar y del medio interestelar se balancean. En este cruce, el viento solar disminuye su temperatura y densidad, y aumenta por otro lado la densidad de rayos cósmicos.

# Interacciones del viento solar con el campo magnético de la Tierra

Podemos estimar la distancia de separación de la magnetosfera que enfrenta al Sol (magnetopausa). La condición es que la presión dinámica ram del viento solar sea igual a la presión magnética del campo magnético de la Tierra:

$$(\rho v^2)_{vs} \approx \left( \frac{4B(r)^2}{2\mu_0} \right)_m$$

donde  $\rho$  y  $v$  son la densidad y la velocidad del viento solar.  $B(r)$  es la intensidad del campo magnético del planeta.

Ya que la intensidad del campo magnético dipolar varía con la distancia como  $1/r^3$ , se puede escribir:  $B(r) = B_0/r^3$ , donde  $B_0 = 8 \times 10^{15}$  Tesla  $m^3$  es el momento magnético de la Tierra. Sustituyendo esta expresión obtenemos

$$\rho v^2 \approx \frac{2B_0^2}{r^6 \mu_0}$$

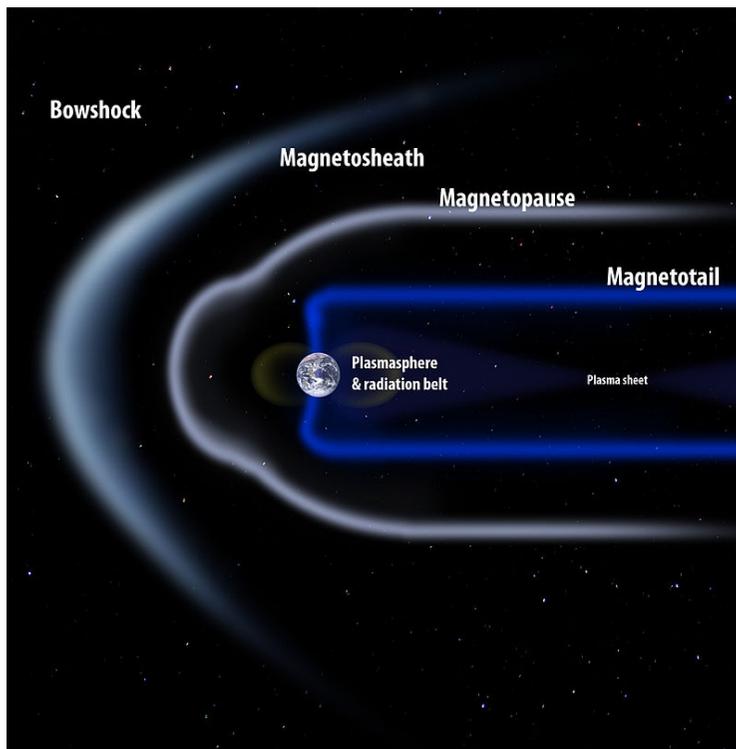
De donde obtenemos la distancia de la magnetopausa:

$$r \approx \left( \frac{2B_0^2}{\mu_0 \rho v^2} \right)^{1/6}$$

**Ejemplo:**  $n = 5$  protones/cm<sup>3</sup>, de donde obtenemos una densidad  $\rho = 8.35 \times 10^{-21}$  kg/m<sup>3</sup>,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ,  $v = 5 \times 10^5$  m/s. Obtenemos:

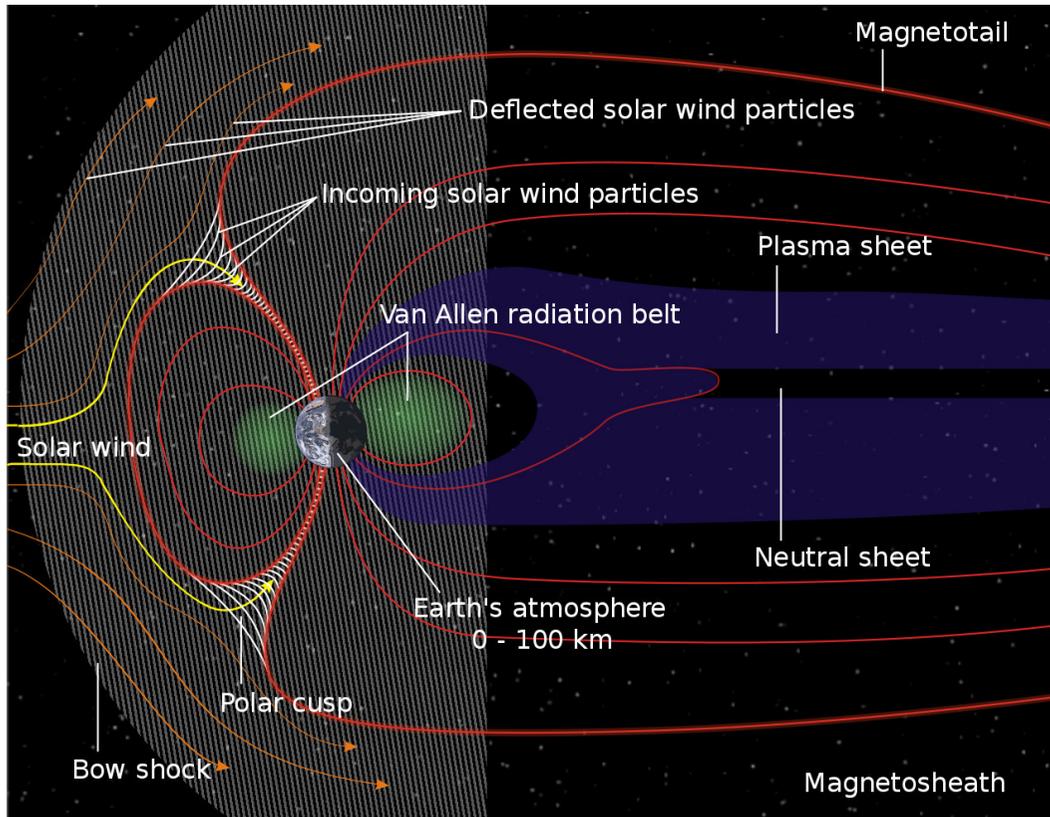
$$r \approx \left[ \frac{2 \times (8 \times 10^{15})^2}{4\pi \times 10^{-7} \times 8.35 \times 10^{-21} \times (5 \times 10^5)^2} \right]^{1/6} \simeq 6 \times 10^7 \text{ m} \simeq 9.4 R_{\oplus}$$

Este valor concuerda bastante bien con el valor observado.



El viento solar es supersónico y se forma una onda de choque antes de la magnetopausa que desacelera y desvía al plasma del viento solar a ambos lados de la magnetopausa. Algo de plasma logra atravesar la magnetopausa y quedar atrapado en la magnetosfera. Al atrapar y desviar partículas muy energéticas, el campo magnético terrestre protege la atmósfera evitando su destrucción.

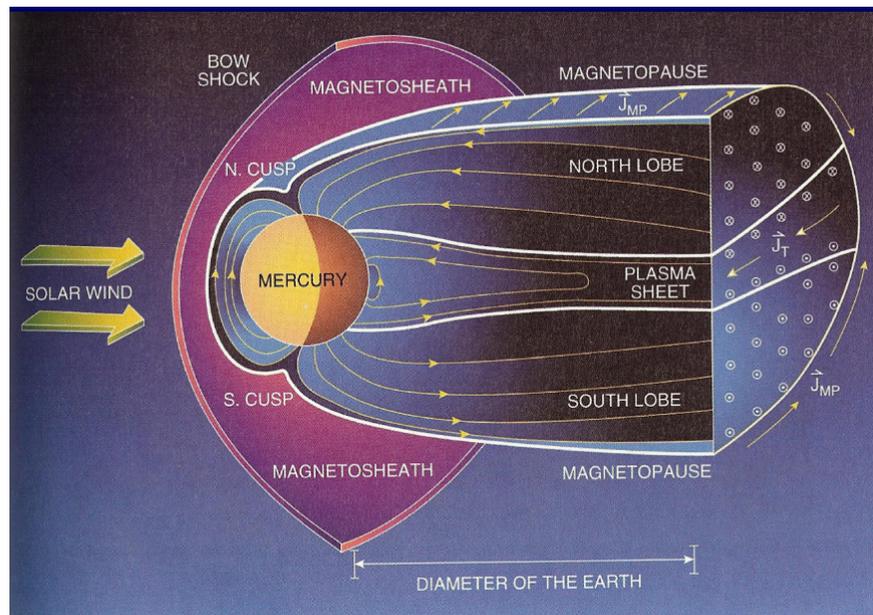
# Cinturones de radiación de Van Allen



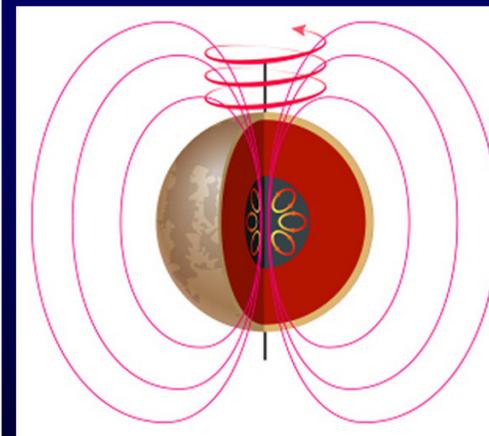
El campo magnético terrestre se comprime del lado del Sol y se extiende a grandes distancias del lado opuesto formando la *magnetocola*. Se encuentran también dos regiones de concentración de partículas cargadas capturadas en su mayoría del viento solar por el campo magnético terrestre, conocidas como los *cinturones de Van Allen*. Estos se extienden desde una altura de unos 640 km hasta 58000 km, con niveles de radiación muy peligrosos para los astronautas y capaces de dañar instrumentos electrónicos que no estén blindados.

# Interacciones del viento solar con otros planetas

**MERCURIO:** A pesar de su pequeño tamaño y lenta rotación (período = 59 días), Mercurio posee un campo magnético bastante intenso de unas  $3 \times 10^{-7}$  Teslas,  $\sim 1\%$  del campo magnético terrestre (de unas  $3 \times 10^{-5}$  Teslas en su superficie). El campo magnético de Mercurio está casi alineado con su eje de rotación. El mismo es lo suficientemente intenso como para desviar el viento solar alrededor del planeta creando una magnetosfera capaz de atrapar el plasma del viento solar, exponiendo la superficie a un incesante bombardeo y creando además una exosfera transitoria.



## Magnetic Field via Active Dynamo



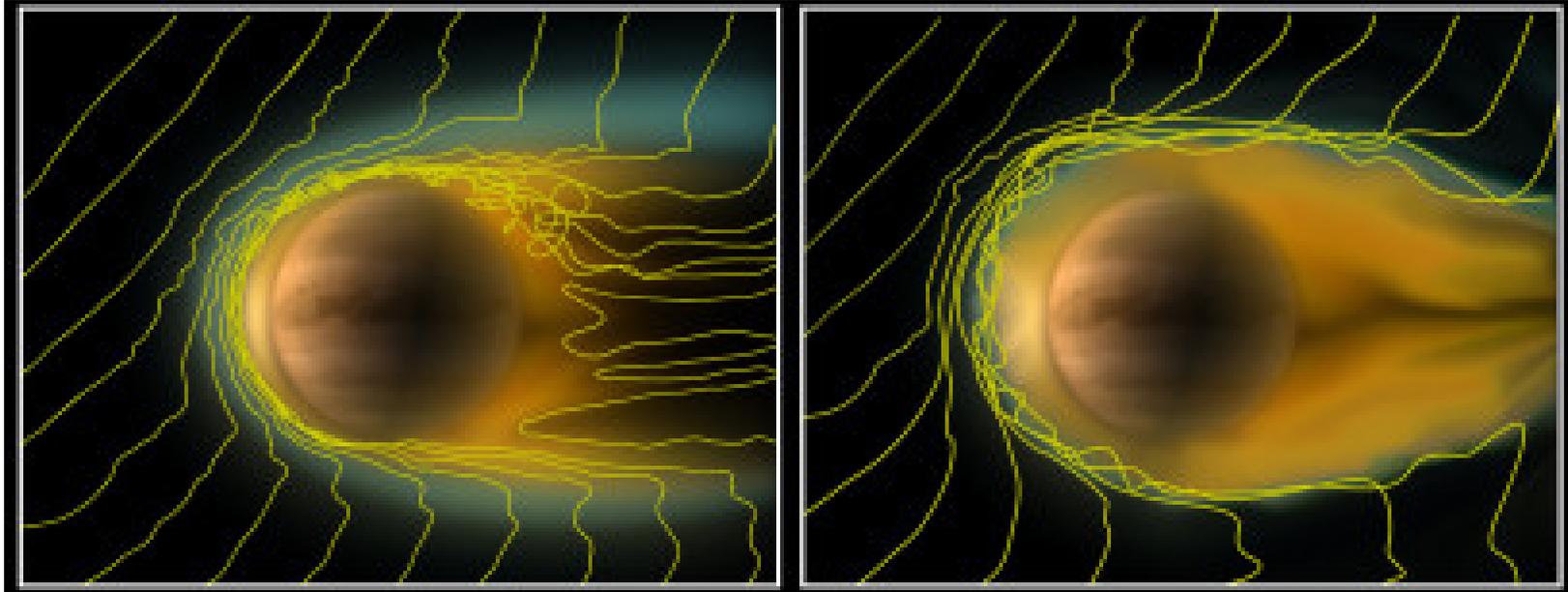
For Active Dynamo Need:

1. Rapid planetary rotation to get conducting material moving about
2. Convection of an electrically conducting fluid in the liquid outer core

As conducting fluid flows across an existing magnetic field, electric currents are induced, which in turn creates or sustains a magnetic field

Courtesy of <https://www.physast.uga.edu>

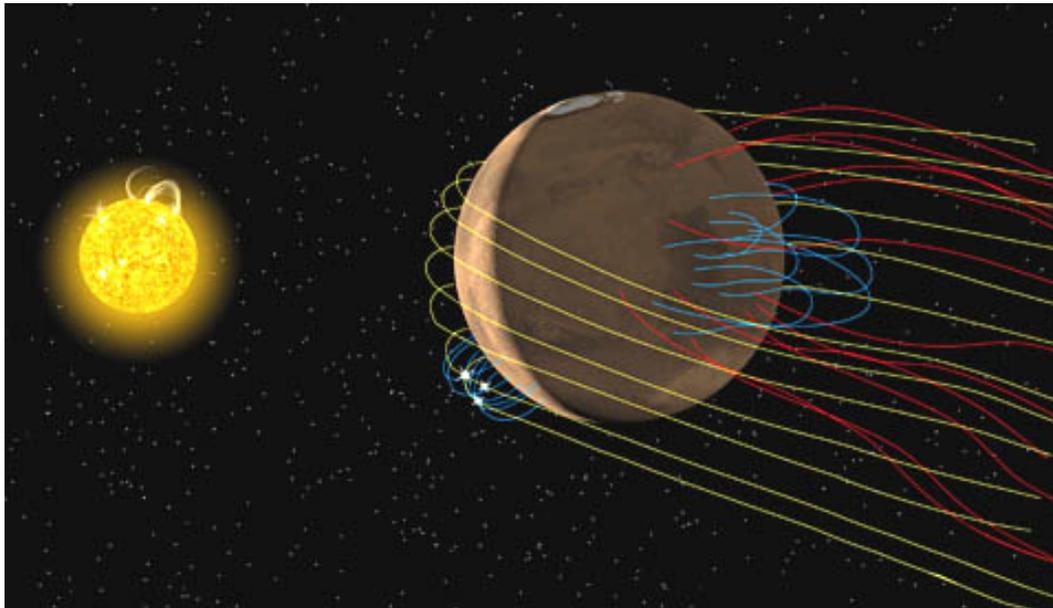
**VENUS:** Un dato sorprendente es que Venus carece de un campo magnético intrínseco, generado por un dínamo, como en la Tierra o Mercurio, probablemente debido a que carece de convección en su núcleo. Venus posee una débil magnetosfera originada por la interacción del viento solar con su atmósfera exterior.



Cuando la presión dinámica del viento solar es normal (izquierda), la ionosfera está confinada a una región unos 150-300 km encima del hemisferio iluminado. Partículas cargadas positivamente viajan a través del terminador para crear una ionosfera similar en el hemisferio nocturno. Si la presión del viento solar cae a niveles muy bajos, la ionosfera se expande encima del hemisferio iluminado, lo que facilita el flujo de iones a través del terminador formando una cola extendida de iones en el hemisferio nocturno.

Por la radiación UV del Sol se disocian moléculas neutras (por ej.  $\text{H}_2\text{O}$ ) en átomos de hidrógeno y oxígeno que se ionizan y terminan siendo llevados por el viento solar. Esto lleva a la pérdida de los iones más livianos (hidrógeno, helio, oxígeno), mientras que moléculas más pesadas como el  $\text{CO}_2$  son retenidas. La erosión ha incrementado el cociente deuterio/hidrógeno en la atmósfera unas 100 veces con respecto a los valores observados en el resto del sistema solar.

**MARTE:** Como en el caso de Venus, Marte tiene una ionosfera pero carece de un campo magnético intrínseco global. Solo en el hemisferio sur existe una magnetización residual de la corteza.

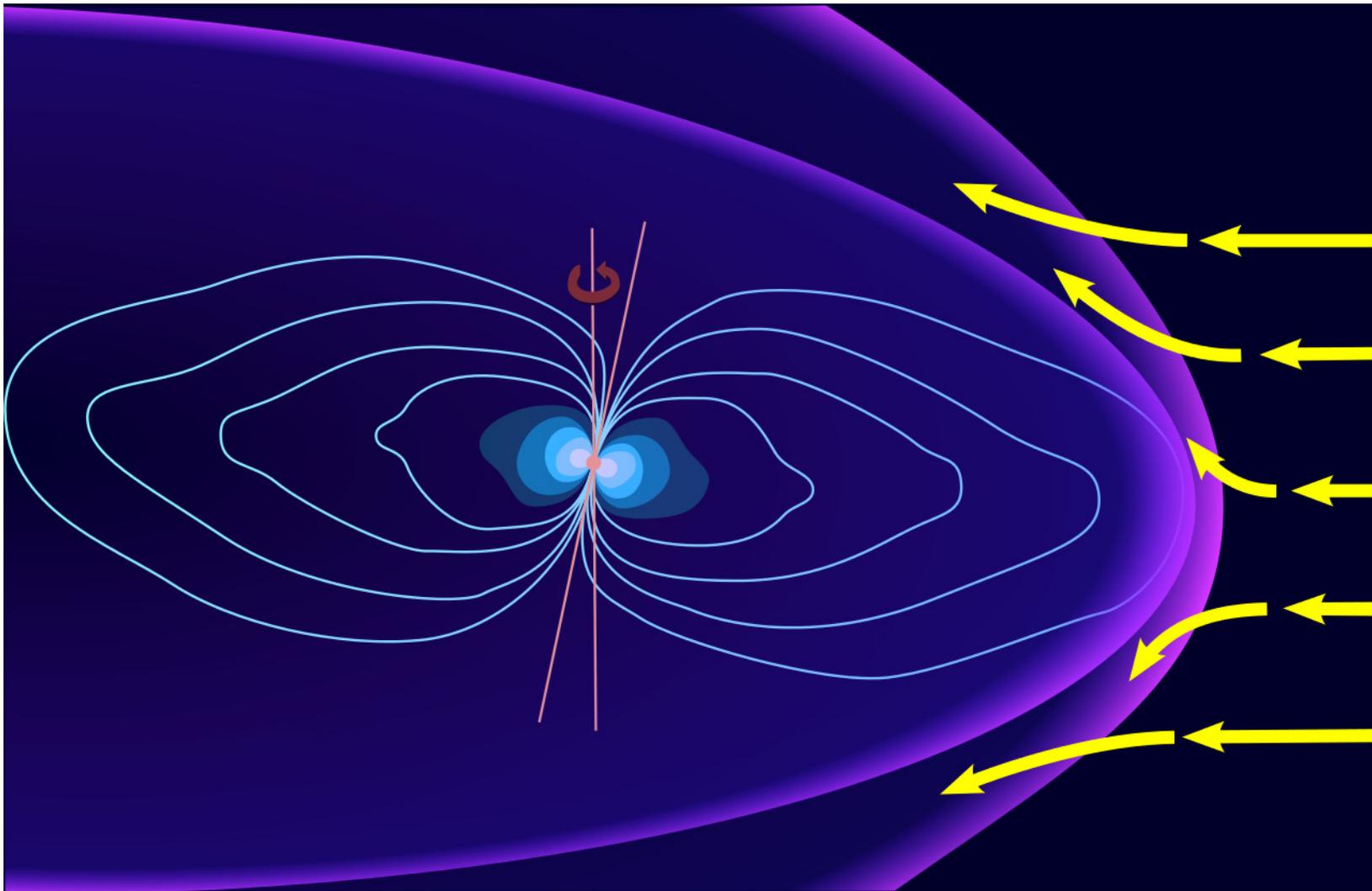


Hay 3 clases de líneas del campo magnético: 1) aquellas que envuelven el planeta por el viento solar (amarillo); 2) líneas cerradas creadas por bolsones de magnetismo en la corteza (azul); 3) líneas de campo abiertas (rojo) creadas cuando las 2 primeras se conectan en el hemisferio diurno.

Ese íntimo contacto de las líneas de fuerza del campo magnético asociadas al viento solar causarían alguna pérdida de gases de la atmósfera de Marte, tanto átomos neutros como iones. Se estima a la presente tasa una pérdida de una cantidad de agua global de una profundidad de 3 m sobre los últimos  $3.5 \times 10^9$  años y apenas 1 milibar de  $\text{CO}_2$ . Esto es apenas una pequeña fracción de su atmósfera primitiva. La pérdida de atmósfera tuvo que ser mucho más vigorosa en el pasado.

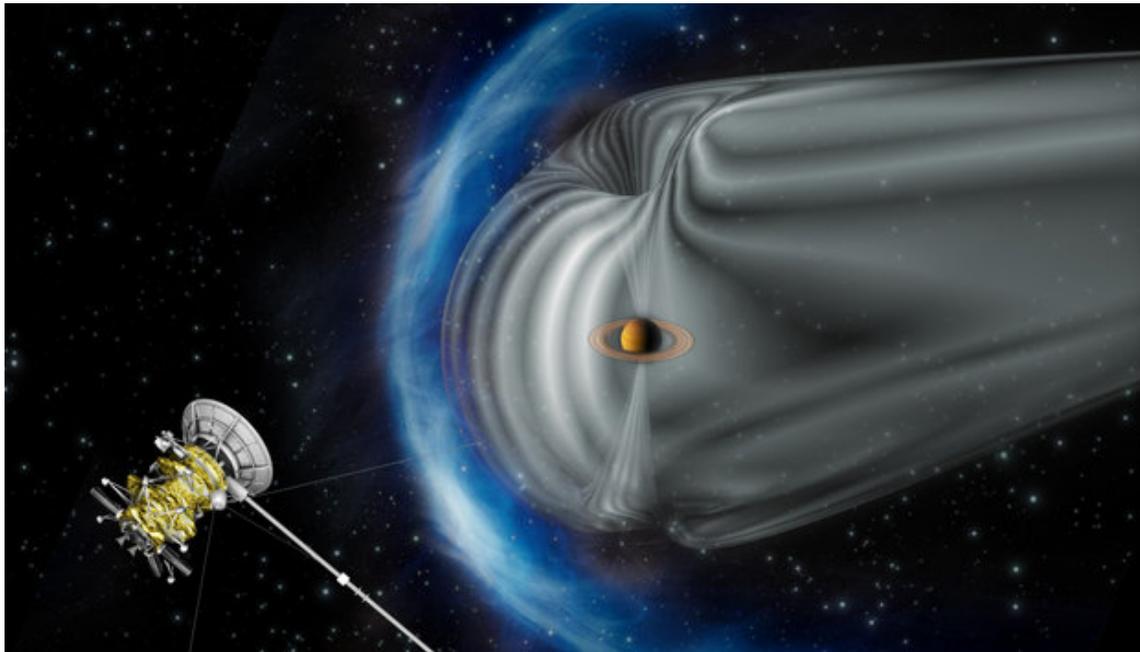
Marte probablemente tuvo un campo magnético global varios millones de años atrás que lo perdió cuando su núcleo líquido solidificó.

**JUPITER:** Su campo magnético es 14 veces más intenso que el de la Tierra, lo cual lo hace el más intenso en el sistema solar con excepción de las manchas solares. La intensidad del campo es de 4.2 Gauss en el ecuador a 10-14 Gauss en los polos ( $0.42 - 1.4 \times 10^{-3}$  Tesla). Su inclinación con respecto al eje de rotación del planeta es de unos  $10^\circ$ . Se considera que el campo es generado por corrientes en forma de vórtice de material conductor en el núcleo de hidrógeno metálico líquido. El intenso campo magnético de Júpiter hace que el frente de choque resultante de su interacción con el viento solar se encuentre a una distancia de 75 radios de Júpiter.



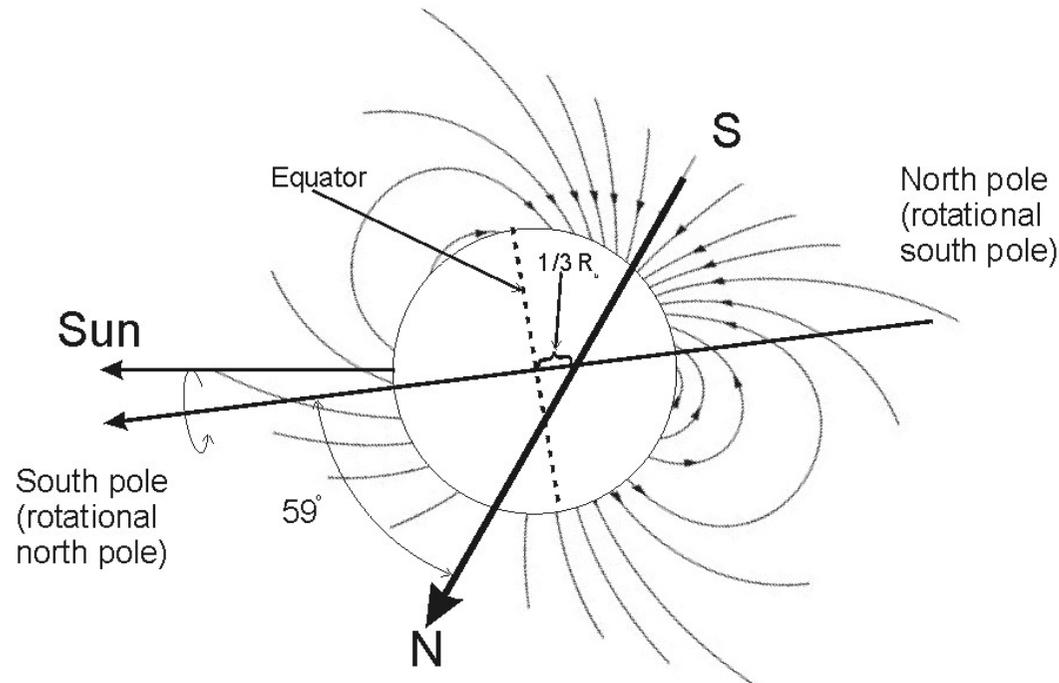
Los volcanes de Io emiten grandes cantidades de  $\text{SO}_2$  que se dispersa formando un toro gaseoso a lo largo de su órbita. El gas es ionizado en la magnetosfera de Júpiter produciendo iones de azufre y oxígeno. Estos, junto con los iones de hidrógeno originados en la atmósfera de Júpiter, forman una lámina de plasma en el plano ecuatorial de Júpiter.

**SATURNO:** El campo magnético de Saturno tiene una intensidad en el ecuador de 0.2 Gauss ( $0.2 \times 10^{-4}$  Tesla), aproximadamente 1/20 del campo magnético de Júpiter y algo más débil que el de la Tierra. Está prácticamente alineado con el eje de rotación del planeta. Se genera por un dínamo como el de Júpiter y los demás planetas con campos dipolares.



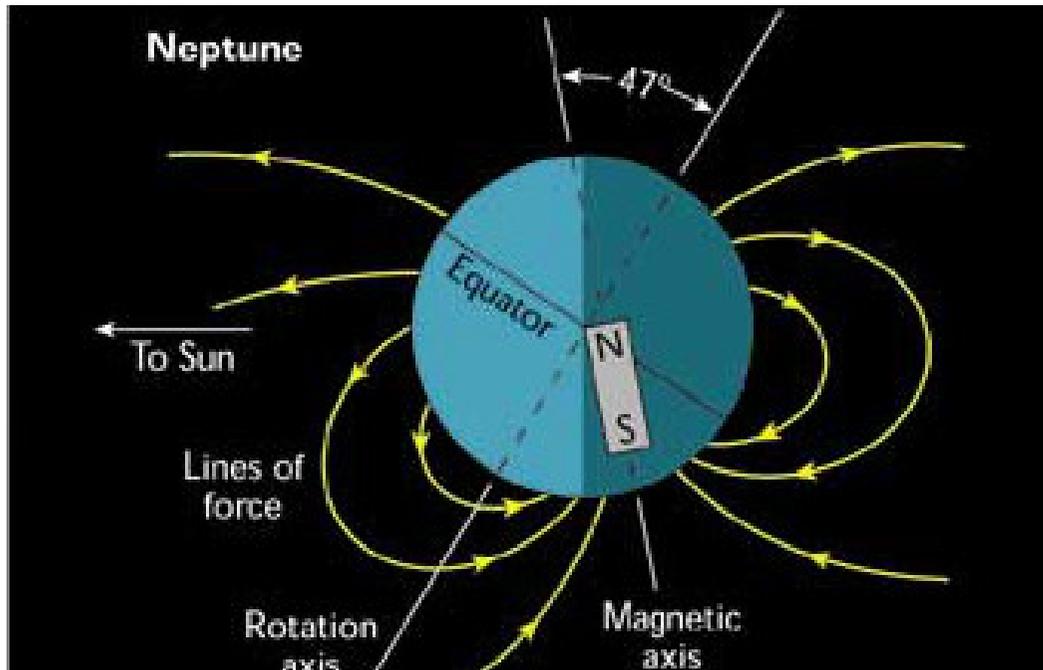
Frente de choque del viento solar con el campo magnético de Saturno a una distancia entre 20 y 35 radios del planeta.

## URANO:



El campo magnético de Urano está inclinado  $59^\circ$  con respecto a su eje de rotación, además no pasa por su centro geométrico. El campo promedio en su superficie es de 0.23 Gauss, con una fuerte asimetría entre los polos magnéticos norte y sur. El frente de choque se encuentra a unos 23 radios de Urano. Las características de este campo magnético sugieren que no se genera en el núcleo del planeta sino más bien por movimiento de material eléctricamente conductor en capas superficiales.

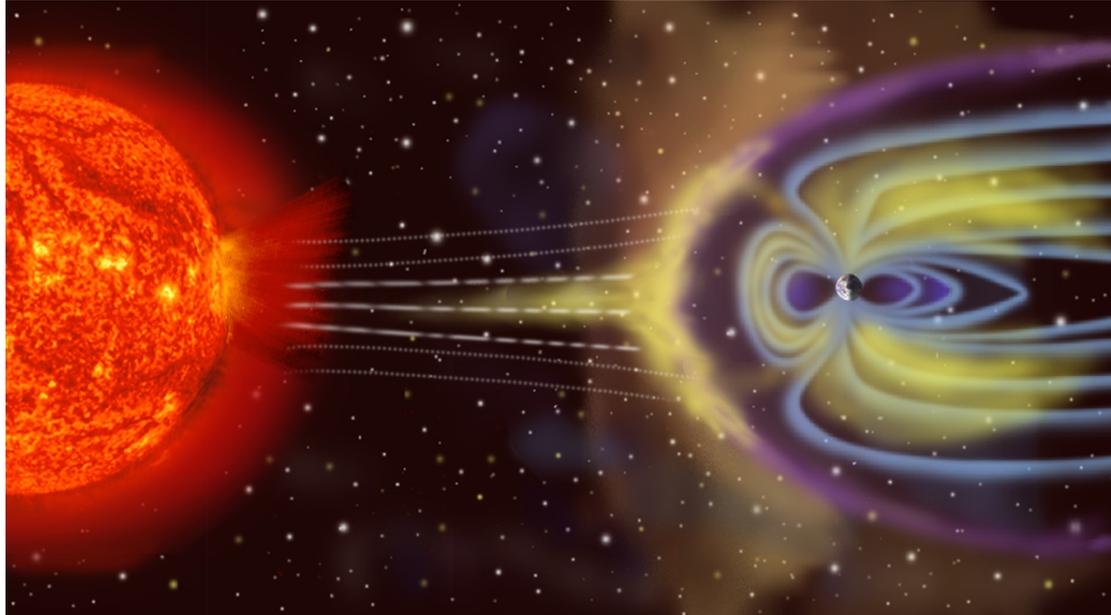
## NEPTUNO:



El campo magnético de Neptuno se asemeja mucho al de Urano: está inclinado  $47^\circ$  con respecto a su eje de rotación, y pasa a unos 0.55 radios de su centro geométrico. El campo en el ecuador magnético de Neptuno es de 0.14 Gauss, con una fuerte asimetría entre los polos magnéticos norte y sur. El frente de choque donde el viento solar se desvía se encuentra a unos 35 radios de Neptuno. Al igual que en el caso de Urano, el campo se genera en capas cercanas a la superficie por movimientos convectivos de líquidos eléctricamente conductores (probablemente una combinación de amoníaco, metano y agua).

# Clima espacial

El clima espacial es una rama de la física espacial referida a la interacción del viento solar y el campo magnético interplanetario transportado por el viento solar con los campos magnéticos planetarios, en particular el de la Tierra.



El clima espacial puede tener distintas manifestaciones:

- Electrónica de satélites artificiales que puede ser afectada durante tormentas geomagnéticas.
- Cambios orbitales en satélites en órbitas bajas cuando una tormenta geomagnética cambia las condiciones de la termosfera, agregando fricción al movimiento del satélite.

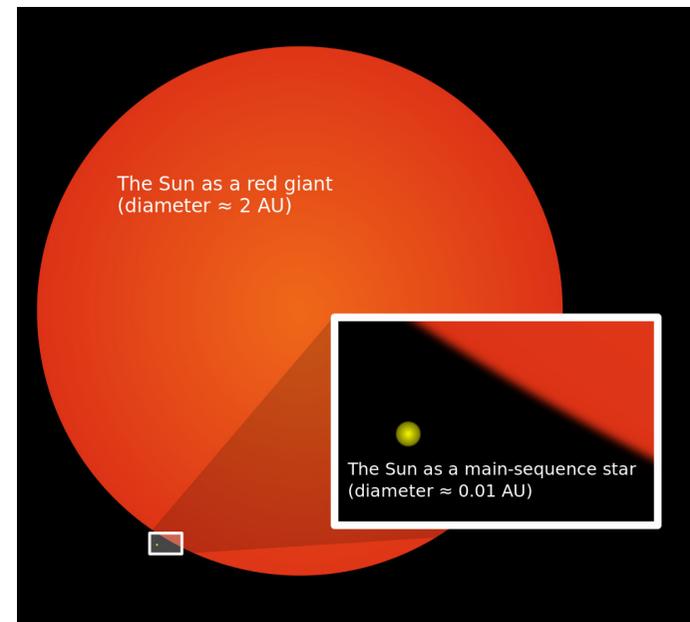
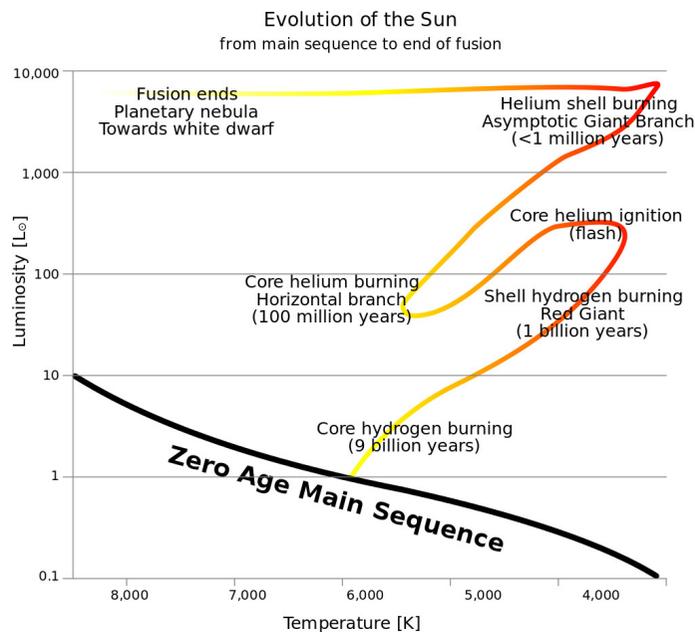


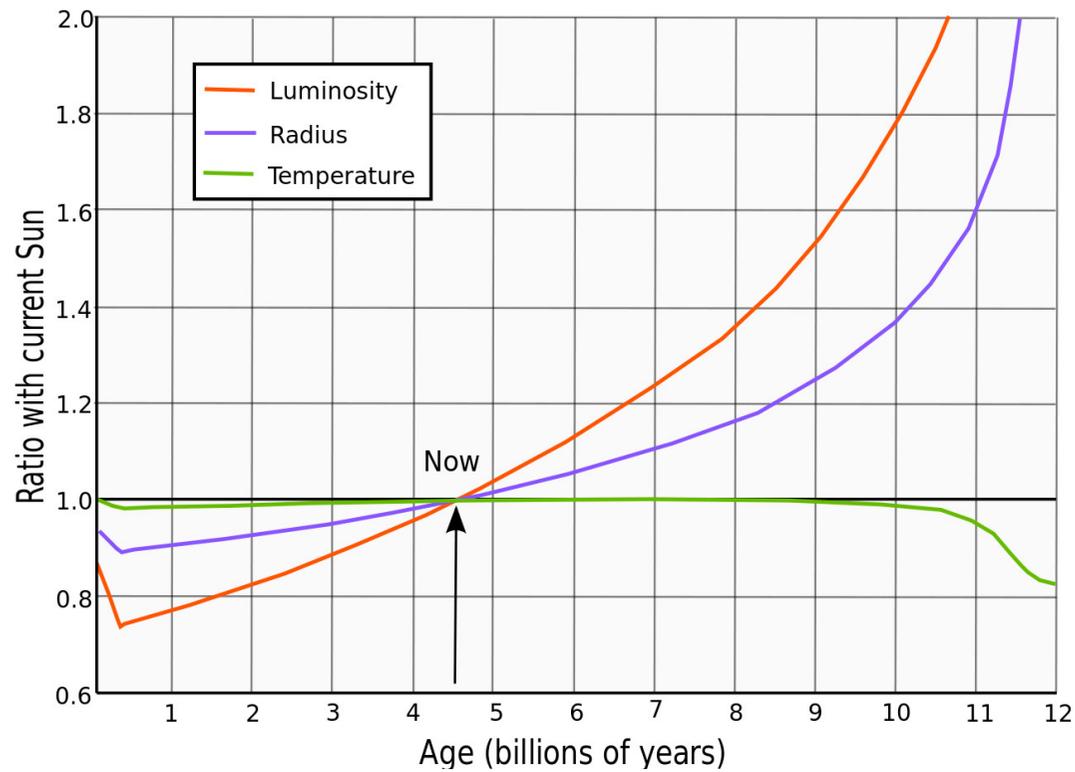
Auroras polares

- Perturbaciones en la transmisión de radiofrecuencia por cambios en la ionosfera.
- Exposición a dosis muy altas de radiación ionizante durante eycciones de masas coronales que descargan en el espacio altos flujos de partículas muy energéticas que podrían poner en peligro la vida de los astronautas.
- Auroras polares (boreales y australes) que resultan de perturbaciones de la magnetosfera por el viento solar. Los constituyentes atmosféricos se excitan e ionizan emitiendo luz de distintos colores y complejidad.

# El futuro del Sol

El Sol es una estrella de clase espectral G2 de la Secuencia Principal (SP) y se estima que está en la mitad de su vida en dicha secuencia. En la SP el Sol evoluciona muy lentamente generando su energía por la fusión de 4 núcleos atómicos de hidrógeno para formar uno de helio. Estas reacciones termonucleares convierten más de 4 toneladas de materia en energía cada segundo. Al cabo de  $10^{10}$  años desde su formación, el Sol habrá consumido todo el hidrógeno de su núcleo que se habrá convertido en helio. Ese es un momento crucial: se agota la energía de fusión termonuclear del hidrógeno, el Sol entra en un desequilibrio que lo lleva a abandonar la SP para convertirse en una gigante roja.





Aun en la SP, la luminosidad del Sol habrá variado por un factor de más de dos, desde el momento que ingresó en la SP hasta el momento que la abandone. Ese cambio en la luminosidad traerá aparejadas consecuencias en la evolución del clima de nuestro planeta.