

# Sistema Solar: el Sol

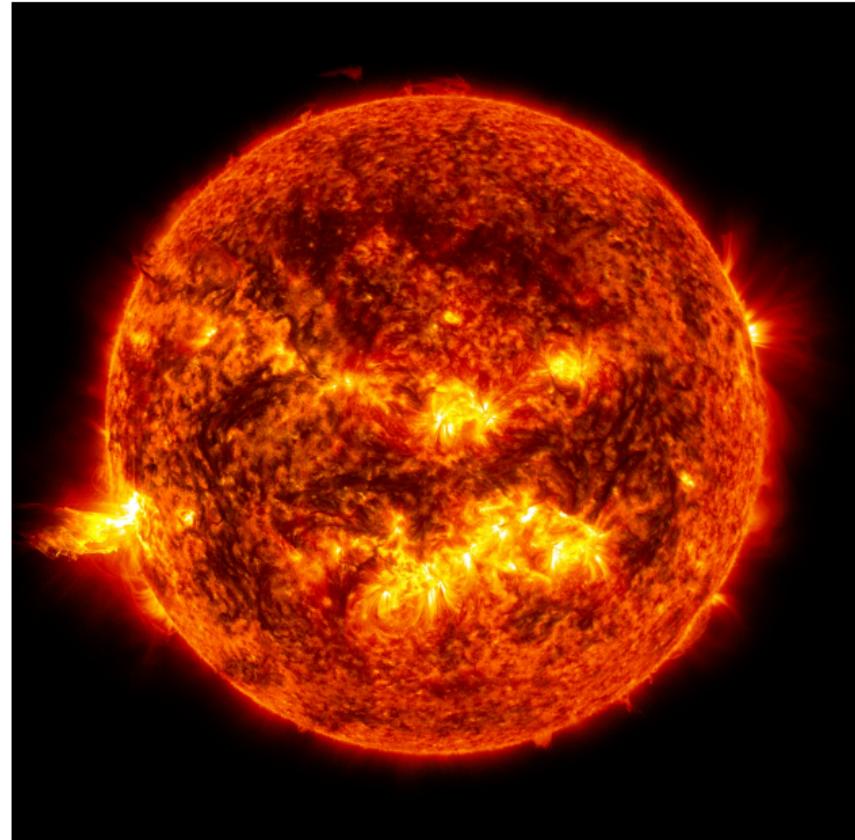
Ernesto Nicola

Palma de Mallorca, 18-11-2021



# ¿Qué es el Sol?

- El Sol es una estrella (al igual que todos las otras que vemos en el cielo; su aspecto es muy distinto porque está muy cerca!)
- El Sol es nuestra fuente de energía;
  - Prácticamente toda la energía disponible en la tierra proviene del Sol.
  - Ya sea de manera directa a través de la luz solar, o indirecta a través de los vientos, plantas, petróleo, gas, etc.
- La fuente de energía que mantiene el Sol es la fusión nuclear que ocurre en su núcleo
- El Sol es una inmensa esfera caliente de plasma de Hidrógeno

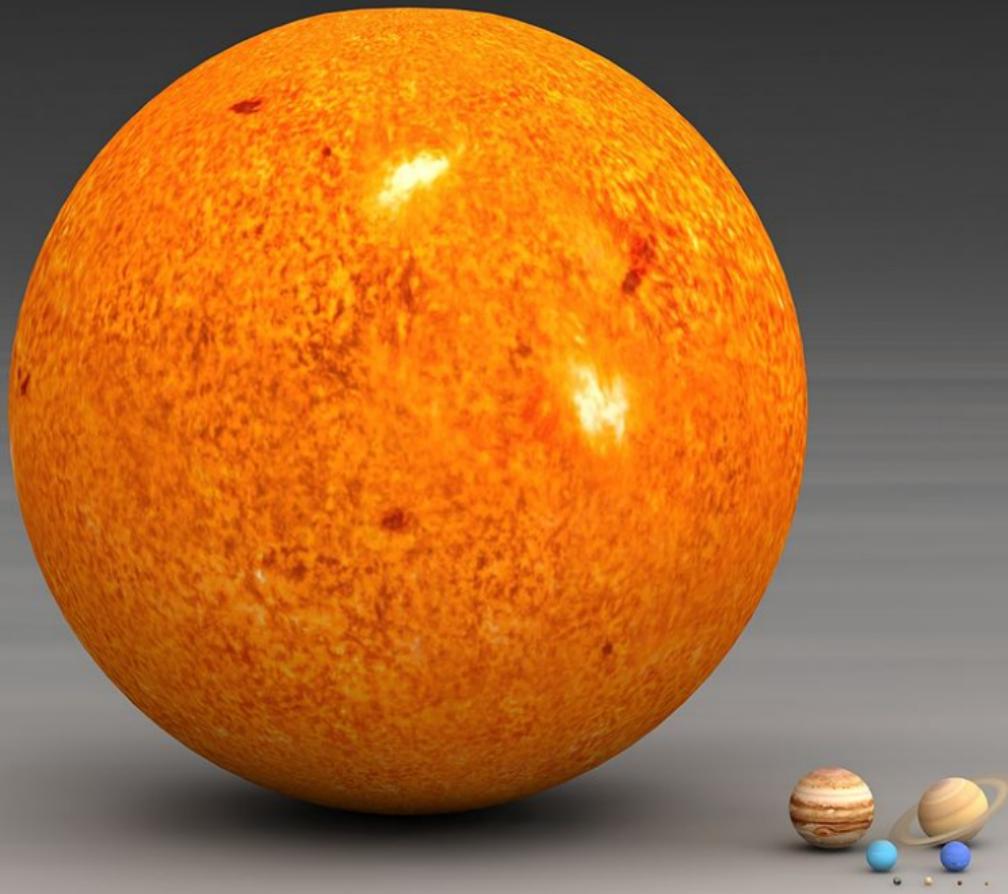


# Contenido de la charla

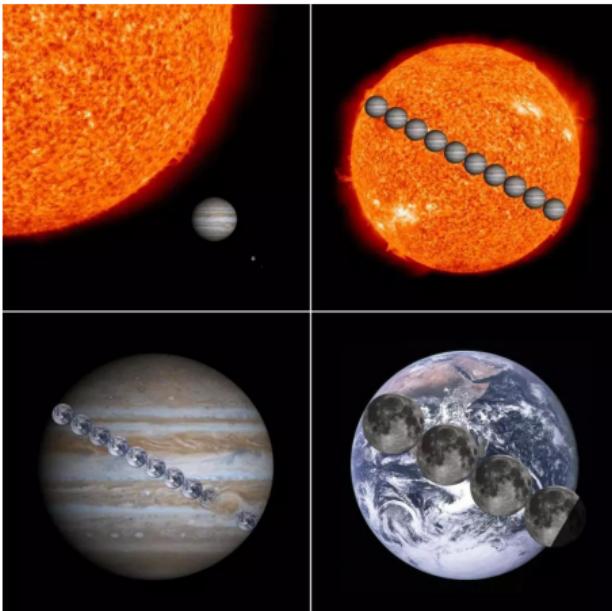
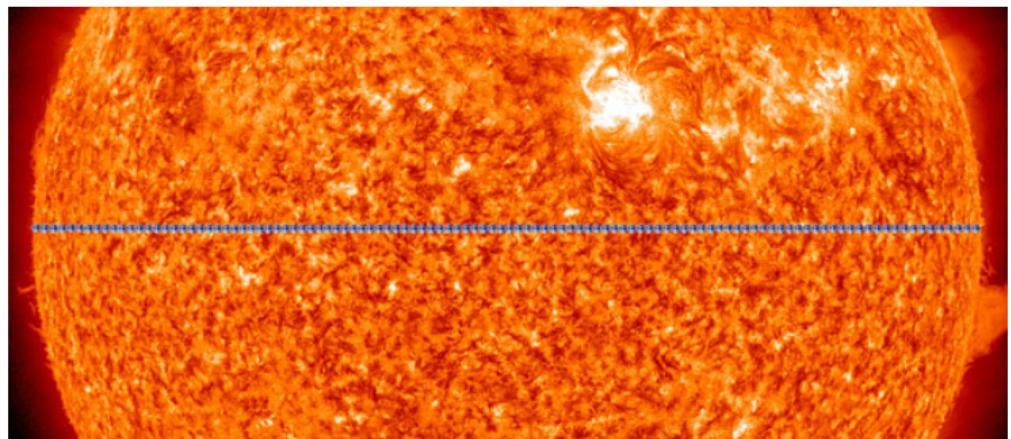
- ① Características del Sol
- ② La Energía del Sol
- ③ Evolución Solar: El Ciclo Vital del Sol
  - Formación del Sol
  - Evolución del Sol
- ④ Anatomía del Sol
  - Interior Solar
    - Núcleo Solar
    - Zona Radiativa
    - Zona Convectiva
  - Atmósfera Solar
    - Fotósfera Solar
    - Cromósfera Solar
    - Corona Solar
- ⑤ Manchas Solares y Zonas Activas
  - Descripción de las Manchas Solares
  - Variaciones de las Manchas Solares
  - Mecanismo de las Manchas Solares
- ⑥ Observación Solar
  - ¿Por qué observar el Sol?
  - ¿Qué se puede observar en el Sol?

# 1. Características del Sol

# Tamaño: el Sol y los Planetas

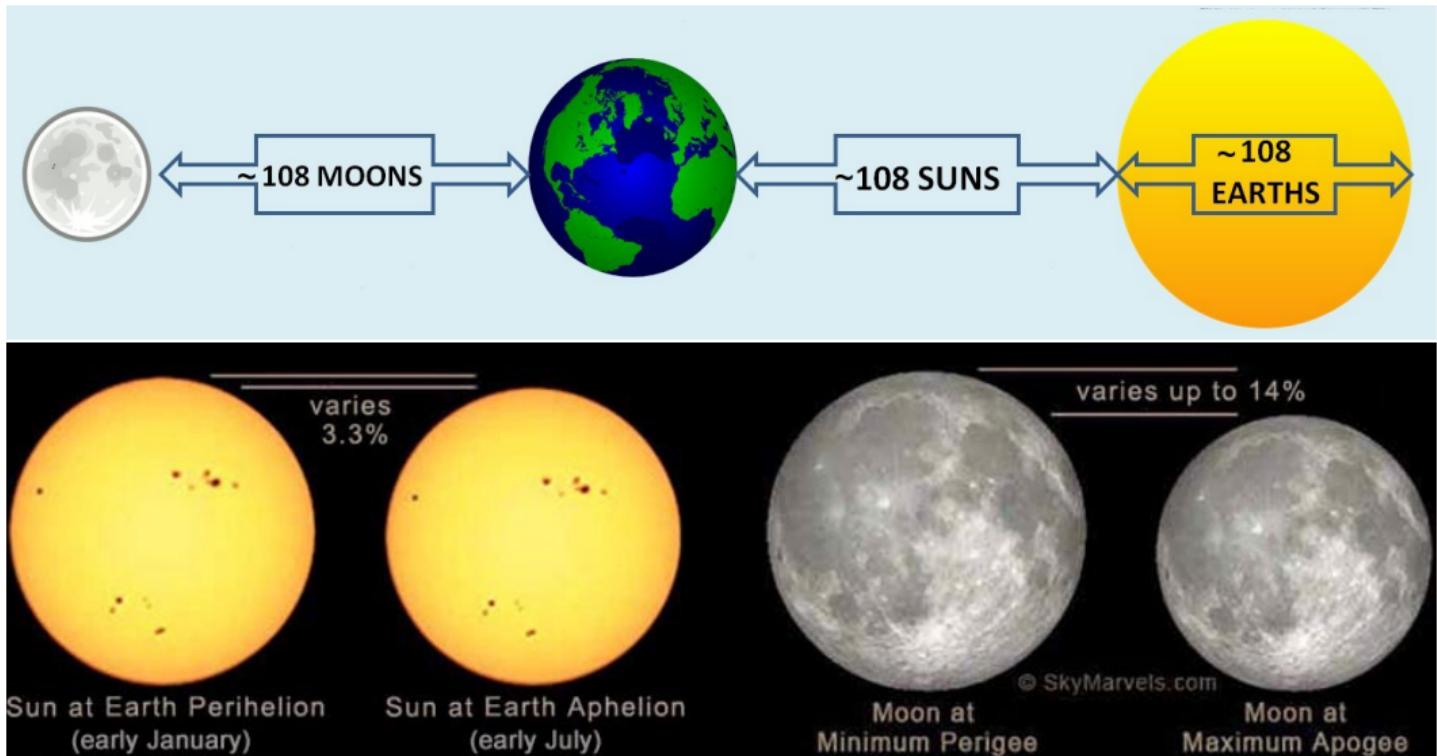


# Tamaño



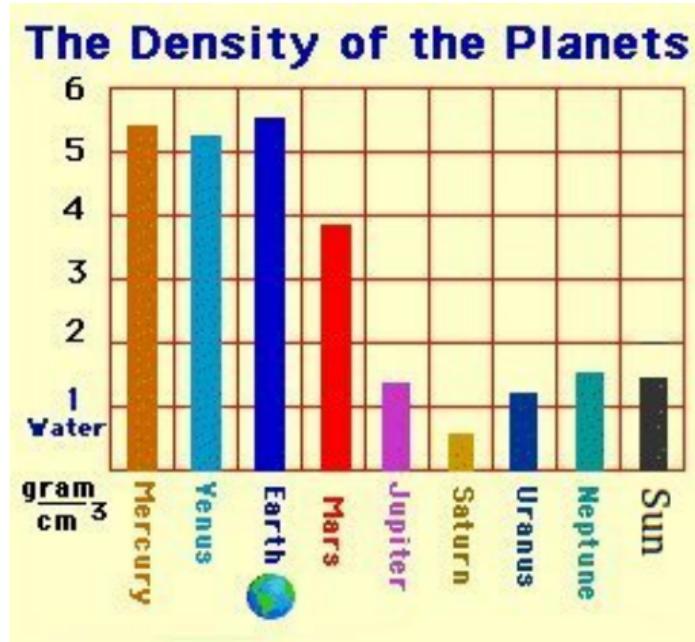
- Diametro: Sol  $\sim 109 \times$  Tierra
- Volumen: Sol  $\sim 1.300.000 \times$  Tierra

# Distancia Sol-Tierra



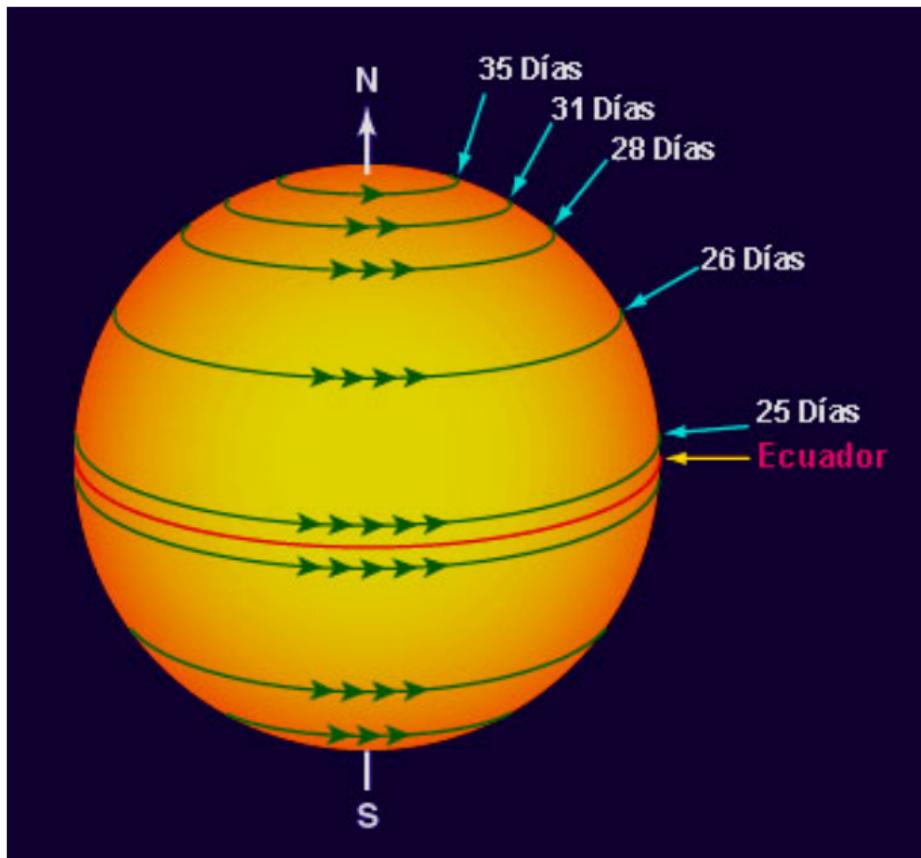
- Distancia Sol-Tierra: 1 AU o 8,3 lm (minutos-luz) (Recordar: 1 lh = 7,2 AU; 1 ld = 173 AU; 1 ly = 63,000 AU; 1 ld = 173 AU; 1 lh = 7,2 AU; 1 lm = 0,12 AU)
- Distancia Sol-Tierra: 108,5 x diámetros solares

# Masa, Volumen y Densidad



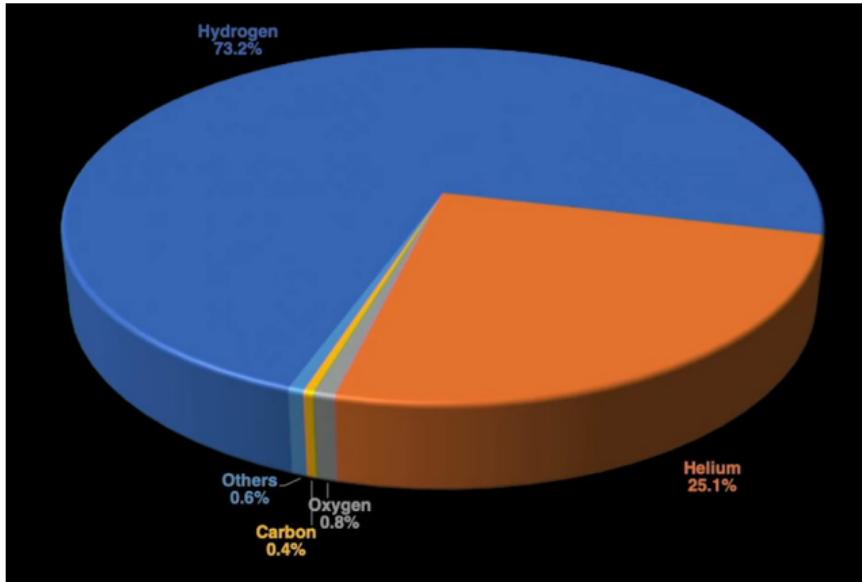
- Masa Solar:  $\sim 333.000 \times$  masas terrestres (contiene 99.68% de la masa del sistema solar)
- Densidad Solar:  $\sim 1.4 \text{g}/\text{cm}^3$  (promedio global)  $\sim 162 \text{g}/\text{cm}^3$  (núcleo)
  - Agua ( $H_2O$ )  $1 \text{g}/\text{cm}^3$ , Sílice ( $SiO_2$ )  $2.6 \text{g}/\text{cm}^3$ , Plomo ( $Pb$ )  $11 \text{g}/\text{cm}^3$  y Oro ( $Au$ ):  $20 \text{g}/\text{cm}^3$

# Rotación Difencial



- Período de rotación (sideral):
  - Ecuador: 25.05 días
  - Polos: 34.4 días
- El Sol es una esfera casi perfecta; hay una diferencia de solo 10km entre el diámetro polar y el ecuatorial

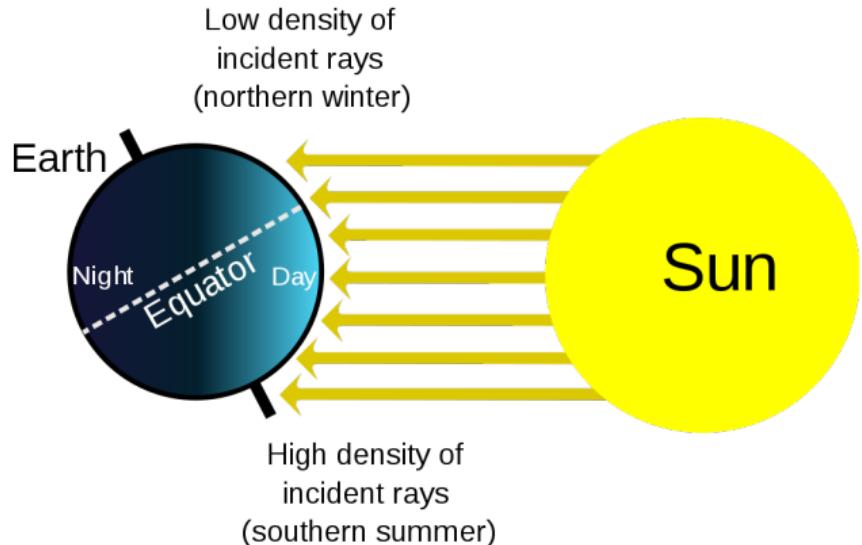
# Composición del Sol



- Composición del Sol:
  - $H$  (Hidrógeno): 73,7% por masa (o 92,1% por número de átomos)
  - $He$  (Helio): 24,8% por masa (o 7,8% por número de átomos)
  - El 1,5% (por masa) restante: principalmente  $O$  (Oxígeno),  $C$  (Carbono),  $Fe$  (Hierro),  $Ne$  (Neón),  $N$  (Nitrogeno),  $Si$  (Silicio),  $Mg$  (Magnesio),  $S$  (Sulfuro)
- Temperatura de la superficie del Sol: 5.772°K
- Edad del Sol: 4.600 millones de años

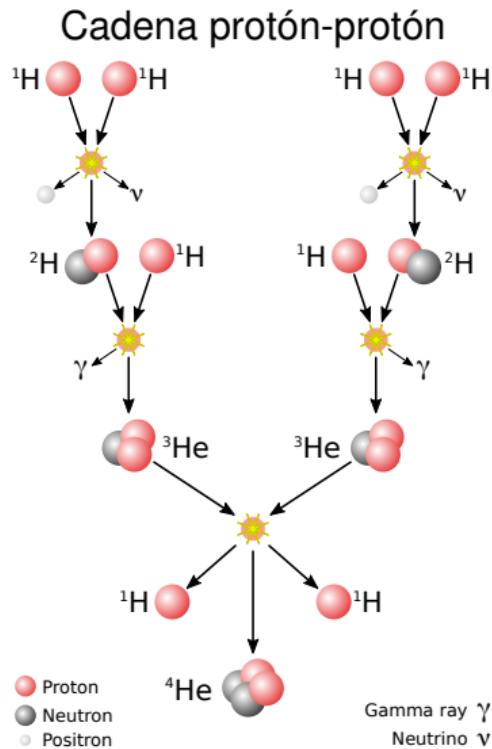
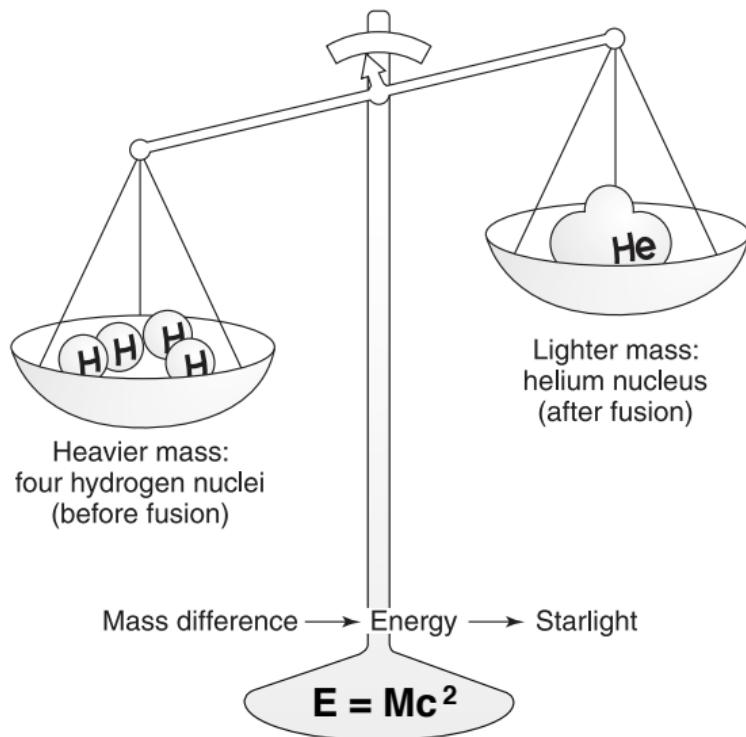
## 2. La Energía del Sol

# ¿De dónde proviene la Energía del Sol?



- Teorías antiguas, previas a la mecánica cuántica:
  - 1 Calor del impacto de asteroides y meteoroides
  - 2 Energía gravitacional disipada en forma de calor debido a la contracción
    - Esta fuente de energía solo estaba disponible durante los primeros 10-100 millones de años de existencia del Sol.
  - 3 Decaimiento Radioactivo
- Teoría moderna: Fusión nuclear (Hans Bethe 1930')

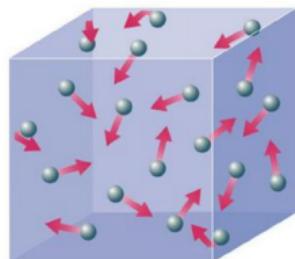
# Fusión Nuclear en el Interior del Sol



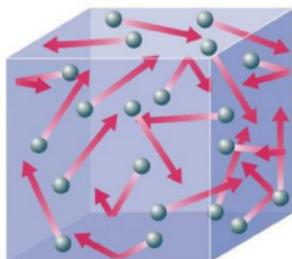
- El Sol convierte 4 núcleos de Hidrógeno en uno de Helio
- Clave:  $E = mc^2$ ; al ser  $c$  muy grande, un pequeño cambio en la masa genera una gran cantidad de energía.

# El Equilibrio Hidrostático y el Sol

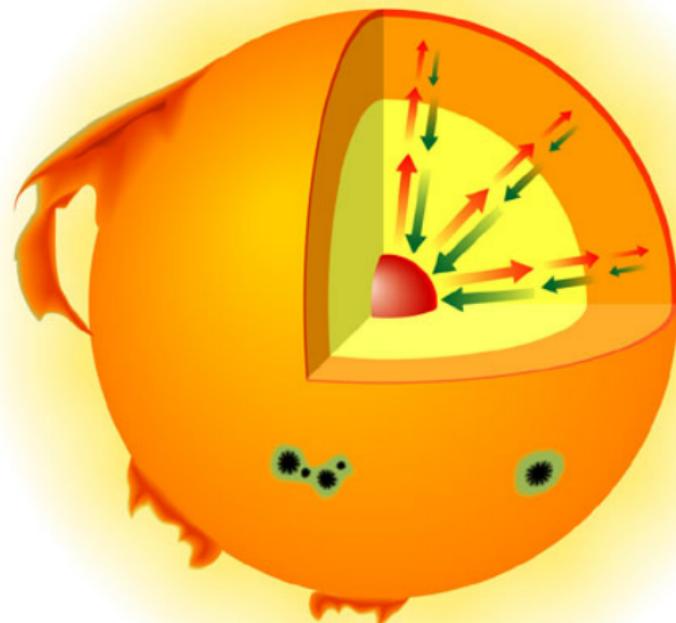
temperatura baja



temperatura alta

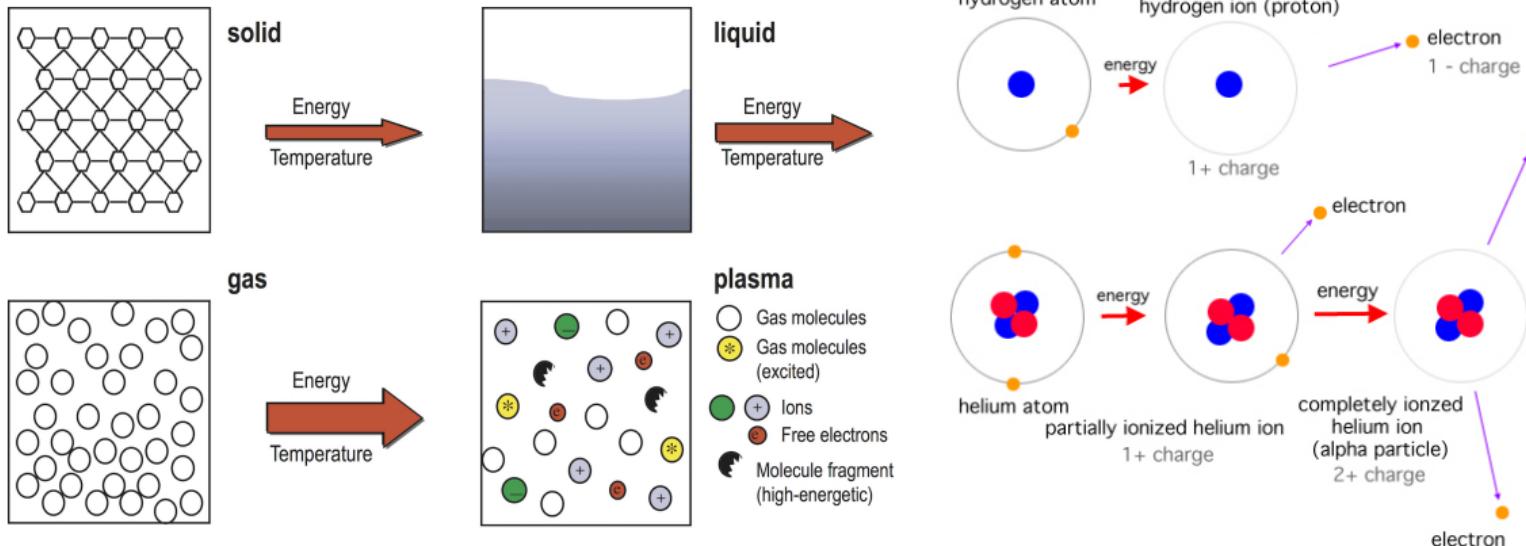


pressure →  
gravity ←



- El **equilibrio hidrostático** entre la presión debida a la alta temperatura en el interior y la fuerza de la gravedad mantiene el tamaño del Sol

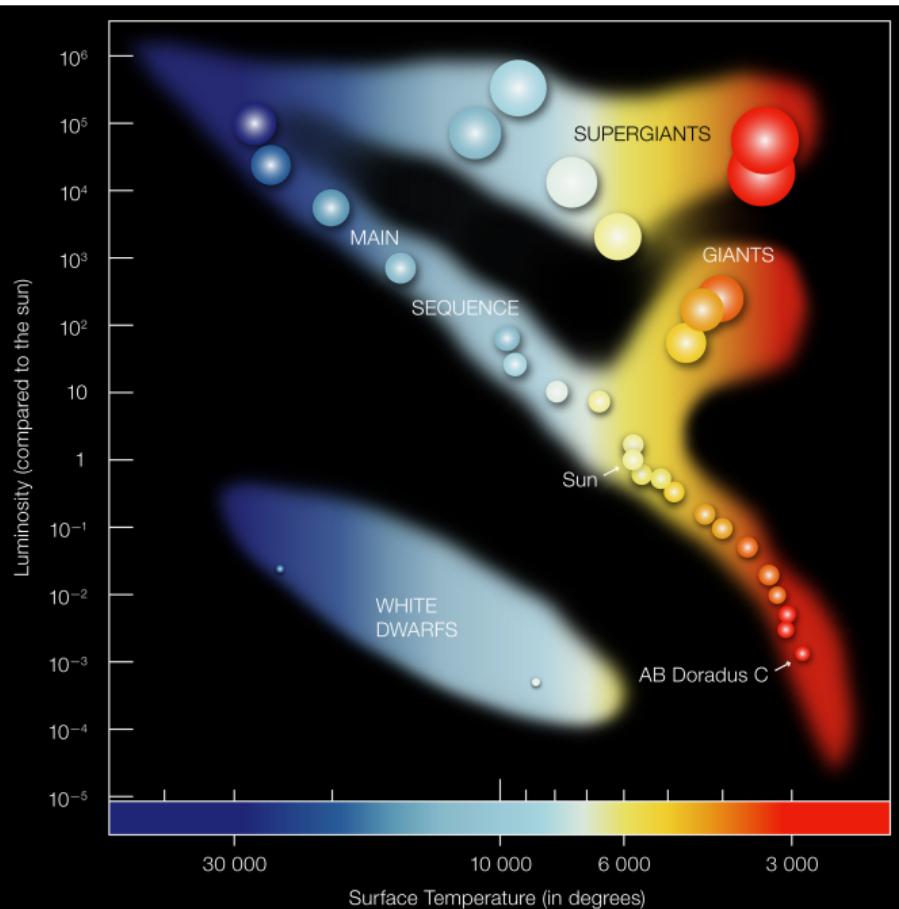
# Plasma: el cuarto estado de la materia



- El plasma se puede caracterizar como un gas ionizado
- El plasma es un estado fluido similar al estado gaseoso pero en el que determinada proporción de sus partículas (átomos o moléculas) están cargadas eléctricamente (ionizadas) y no poseen equilibrio electromagnético.
- Los plasmas son buenos conductores eléctricos y sus partículas responden fuertemente a las interacciones electromagnéticas de largo alcance.

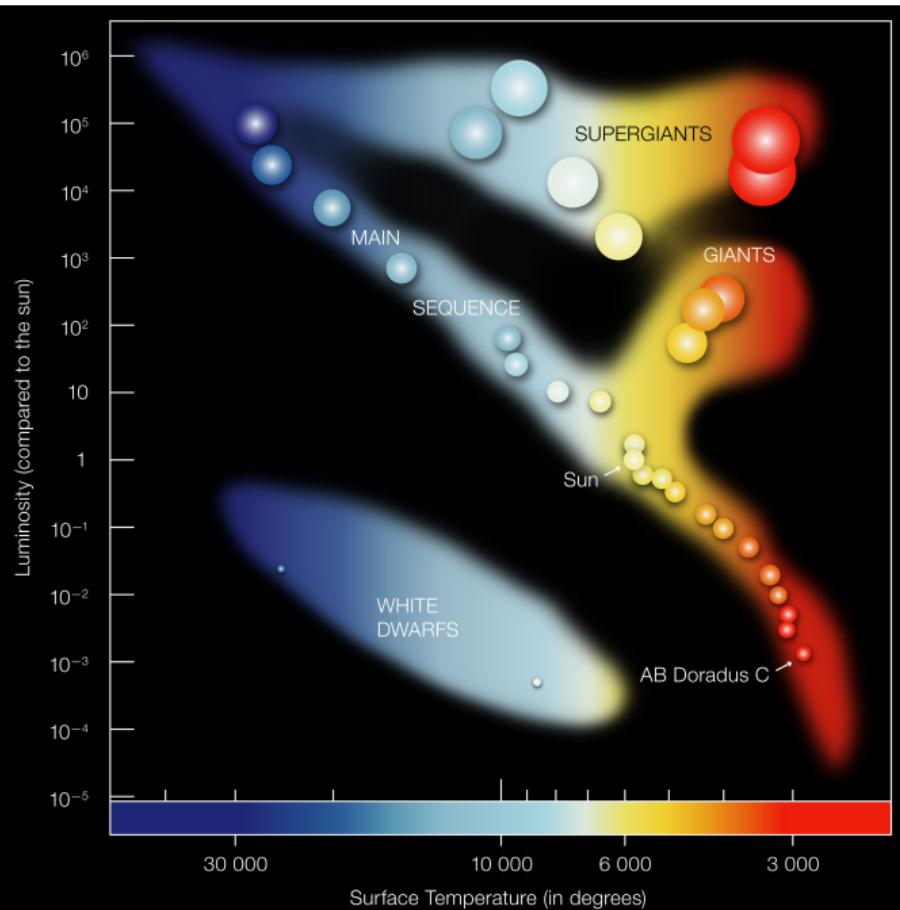
### 3. Evolución Solar: El Ciclo Vital del Sol

# Diagrama de Hertzsprung-Russell ("Diagrama H-R")



- El diagrama de H-R es la "piedra Rosetta" de las estrellas: nos permite analizar de la diversidad de estrellas existentes
- Eje Horizontal: Temperatura de la superficie de la estrella (notar que a la izquierda están las estrellas más calientes). La temperatura está correlacionada con el color visible de la estrella
- Eje Vertical: Luminosidad de la estrella (típicamente indicado de manera comparativa con la luminosidad del Sol)
- Otras características de las estrellas no incluidas: Tamaño, Masa, Temperatura en el núcleo.

# Diagrama de Hertzsprung-Russell ("Diagrama H-R")

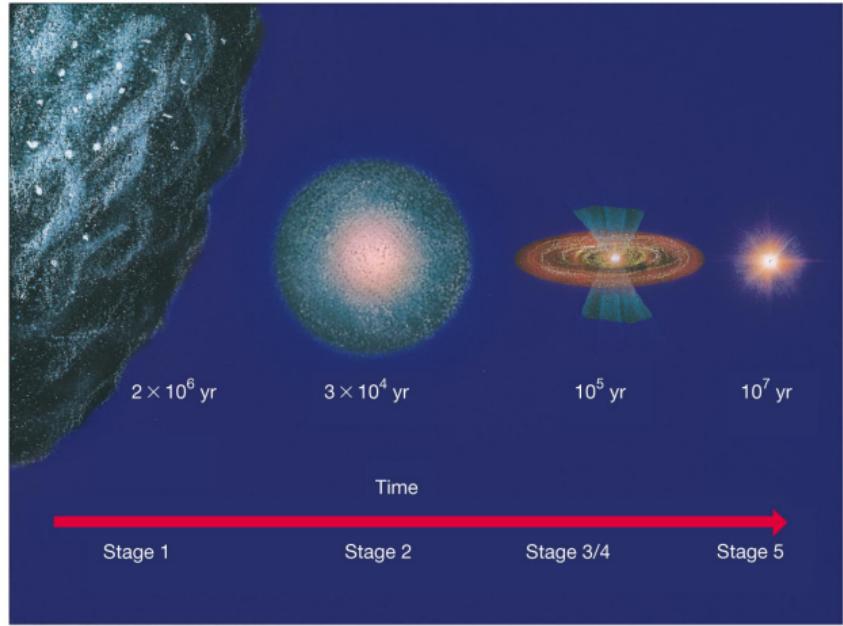


- Zonas del diagrama H-R
  - Secuencia Principal
  - Gigantes Rojas
  - Súper-gigantes Rojas
  - Enanas Blancas

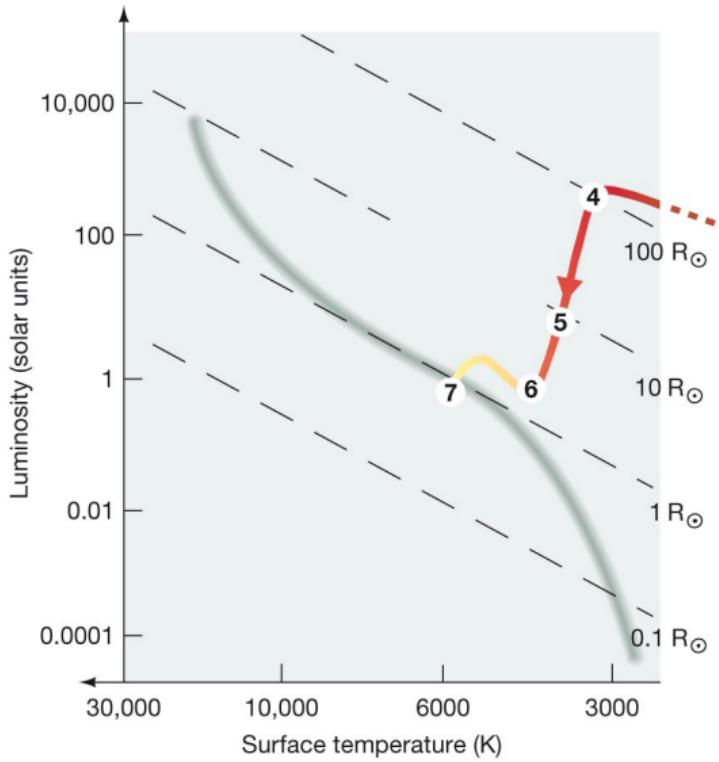
### 3. Evolución Solar: El Ciclo Vital del Sol

#### 3.1. Formación del Sol

# Evolución Solar: De la Nebulosa Solar a la Secuencia Principal



© 2014 Pearson Education, Inc.



- 1-5: Contracción de la nebulosa solar y formación del proto-Sol
- 6: El Sol se "enciende" (se inicia la fusión nuclear)
- 7: El Sol alcanza la secuencia principal (durará 10.000 millones de años)

# Evolución Solar: Antes de llegar a la Secuencia Principal

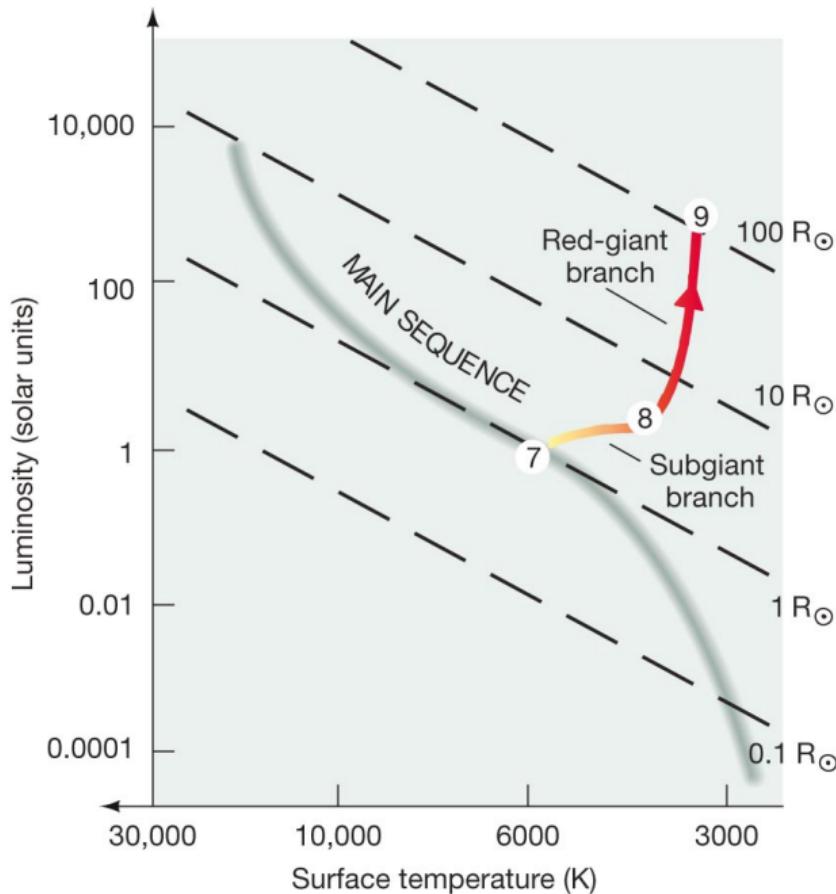
Prestellar Evolution of a Solar-Type Star						
Stage	Approximate Time to Next Stage (yr)	Central Temperature (K)	Surface Temperature (K)	Central Density (particles/m <sup>3</sup> )	Diameter* (km)	Object
1	$2 \times 10^6$	10	10	$10^9$	$10^{14}$	Interstellar cloud
2	$3 \times 10^4$	100	10	$10^{12}$	$10^{12}$	Cloud fragment
3	$10^5$	10,000	100	$10^{18}$	$10^{10}$	Cloud fragment/protostar
4	$10^6$	1,000,000	3000	$10^{24}$	$10^8$	Protostar
5	$10^7$	5,000,000	4000	$10^{28}$	$10^7$	Protostar
6	$3 \times 10^7$	10,000,000	4500	$10^{31}$	$2 \times 10^6$	Star
7	$10^{10}$	15,000,000	6000	$10^{32}$	$1.5 \times 10^6$	Main-sequence star

\*Round numbers; for comparison, recall that the diameter of the Sun is  $1.4 \times 10^6$  km, while that of the solar system is roughly  $1.5 \times 10^{10}$  km.

### 3. Evolución Solar: El Ciclo Vital del Sol

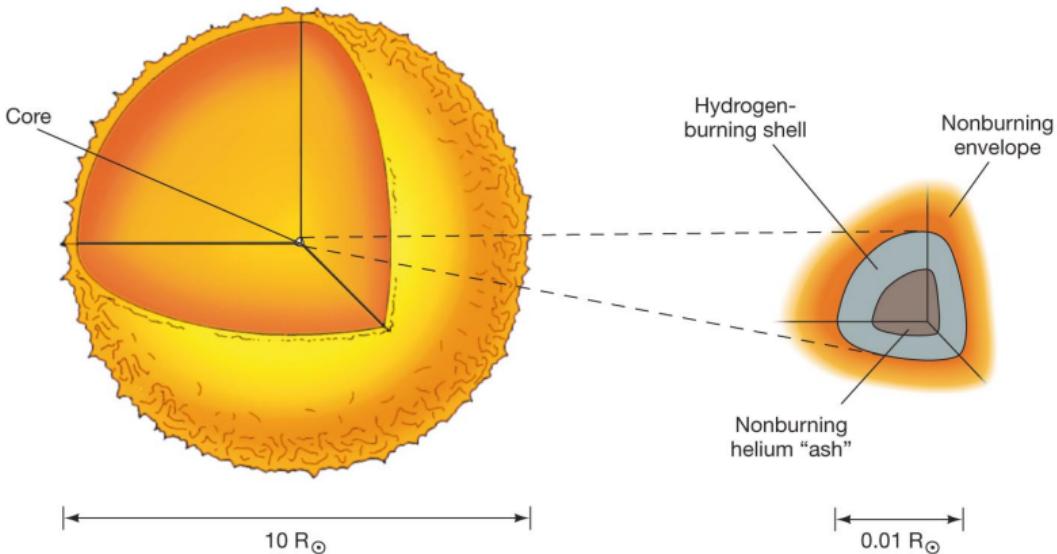
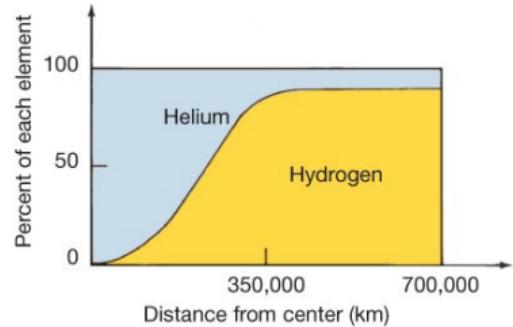
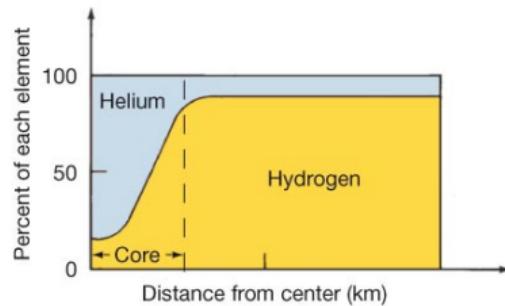
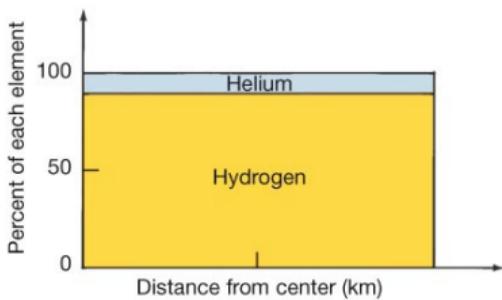
#### 3.2. Evolución del Sol

# Evolución Solar: De la Secuencia Principal a la Gigante Roja

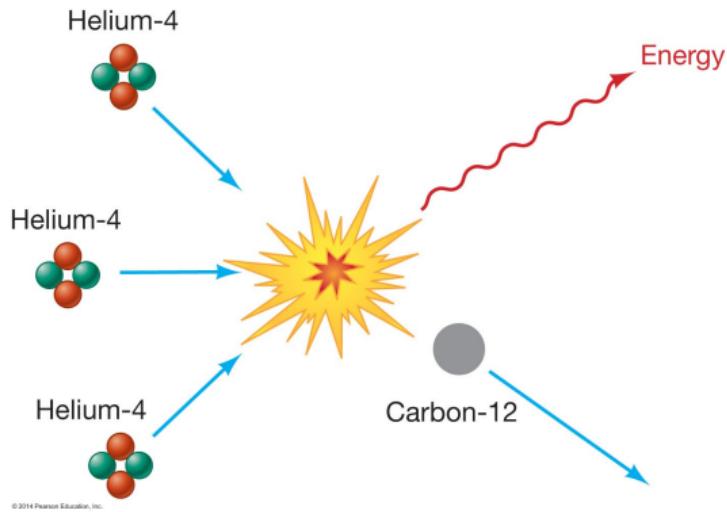
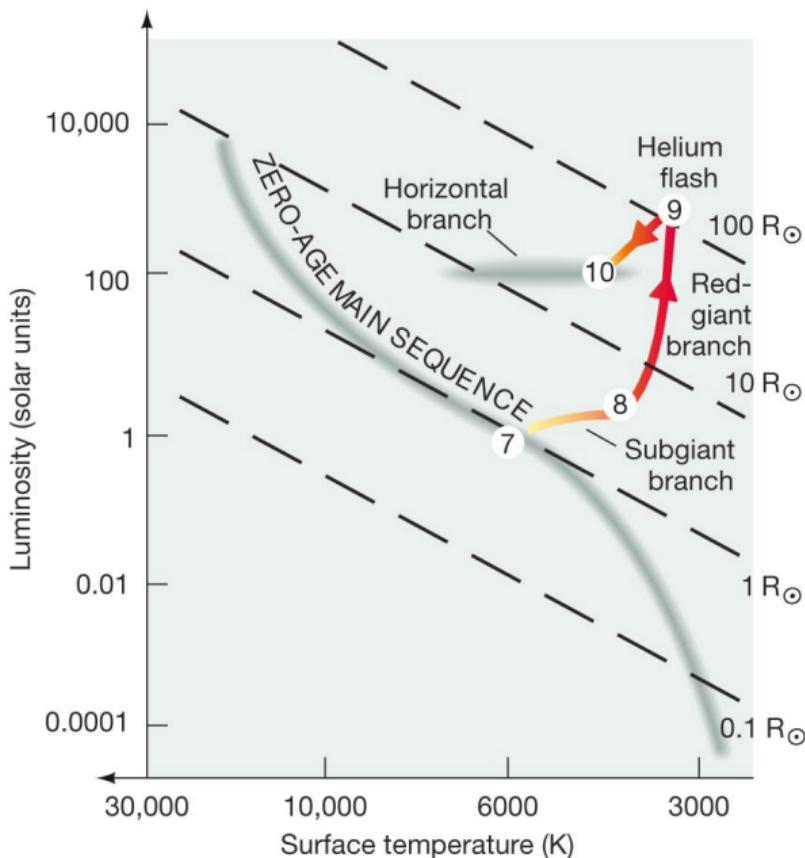


- 7: secuencia principal
  - El Sol fusiona Hidrógeno en Helio en su núcleo
  - Pocos cambios en la estrella
  - Durará 10.000 millones de años
- 8: Se comienza a acabar el Hidrógeno en el interior de la estrella
  - El Helio se acumula en el centro;
  - El Hidrógeno se sigue fusionando en una cáscara alrededor de un núcleo de Helio
- 8 a 9: "Rama de Gigante Roja"
- 9: A partir de este punto las temperaturas en el núcleo son suficientes como para fusionar Helio en Carbono.

# Evolución Solar: Fusión del Hidrógeno

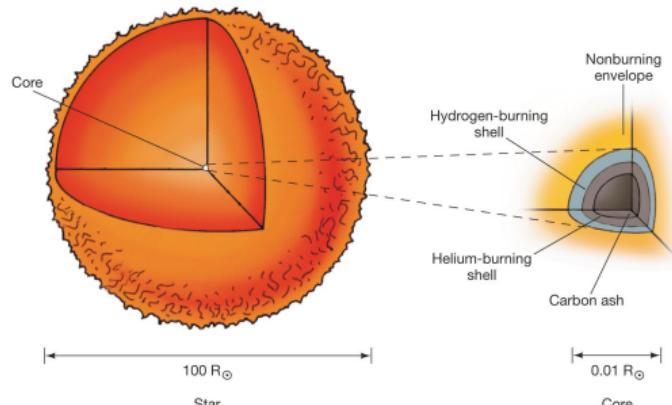
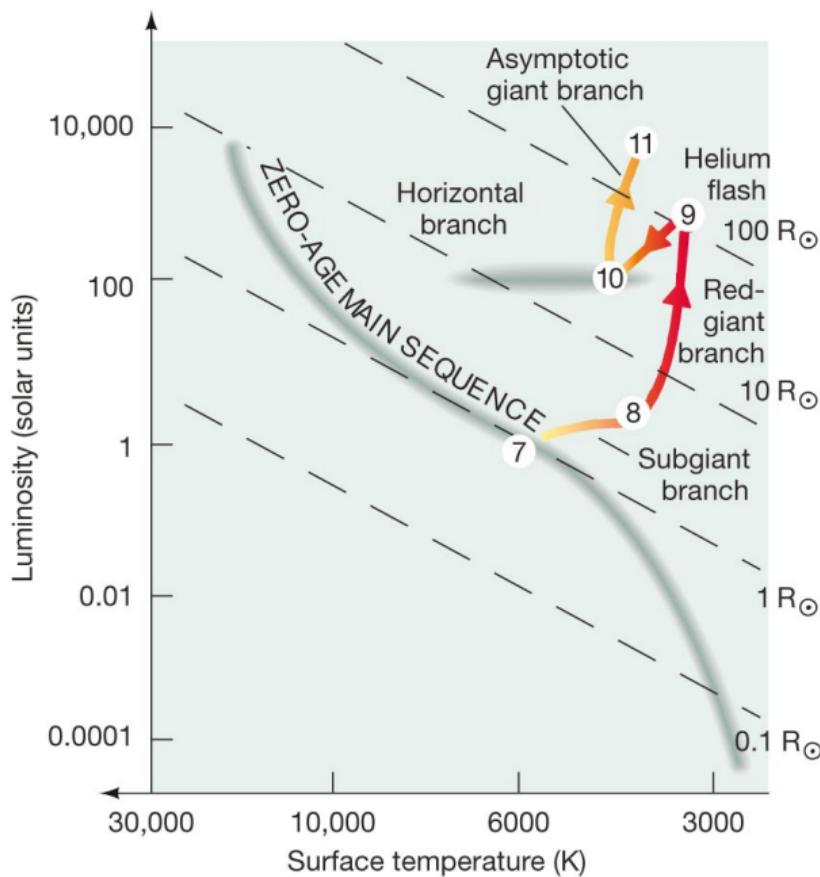


# Evolución Solar: Fusión del Helio



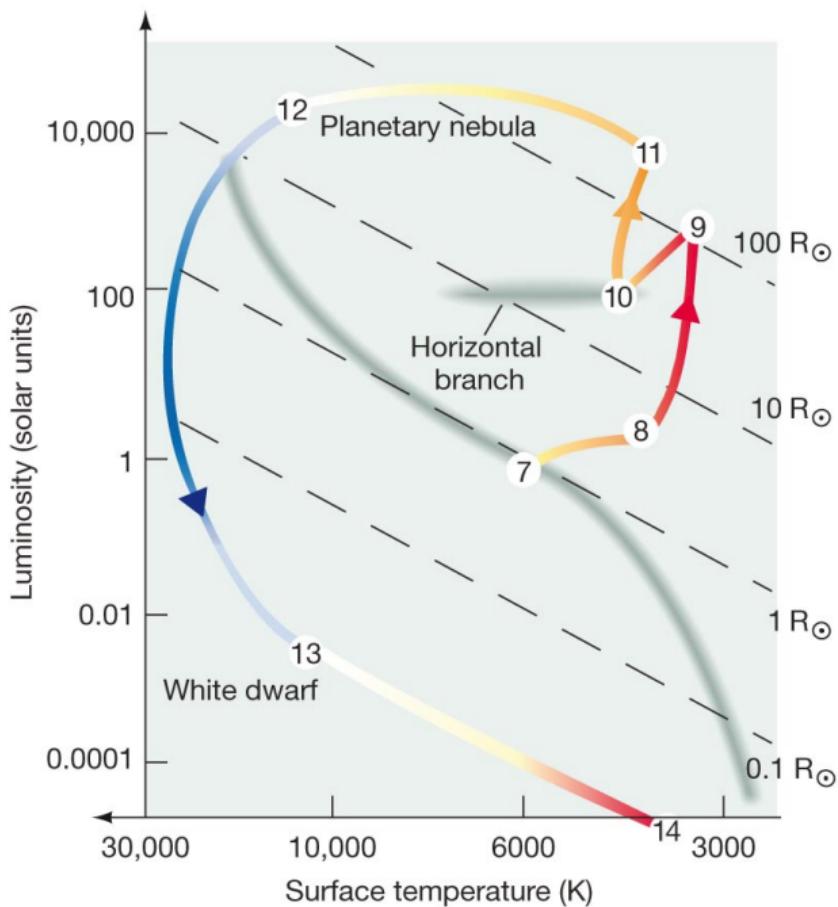
- 9: El Helio del núcleo se comienza a fusionar dando lugar a Carbno
- 10: "Rama Horizontal": zona en la que permanece la estrella mientras se fusiona el helio; es una "secuencia principal" para el Helio

# Evolución Solar: Rama Asintótica de Gigante Roja



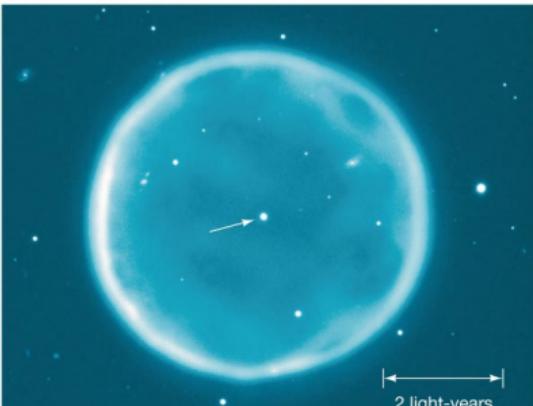
- 10 a 11: "Rama Asintótica de Gigante Roja"
  - El Helio se fusiona en una capa que rodea un núcleo de Carbono
  - El Hidrógeno todavía se fusiona en una capa externa.
- 11: Se termina la fusión en la estrella; se produce una expulsión de sus capas exteriores generando una nebulosa planetaria

# Evolución Solar: Nebulosa Planetaria y Enana Blanca

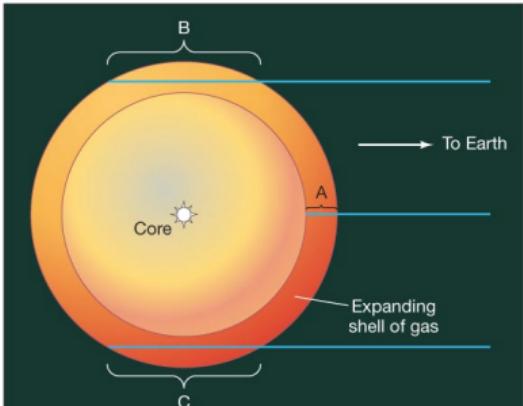


- 11: Se termina la fusión en la estrella; se produce una expulsión de sus capas exteriores generando una nebulosa planetaria
- 12: Nebulosa Planetaria
- 13: Enana Blanca
- 14: Enana Negra

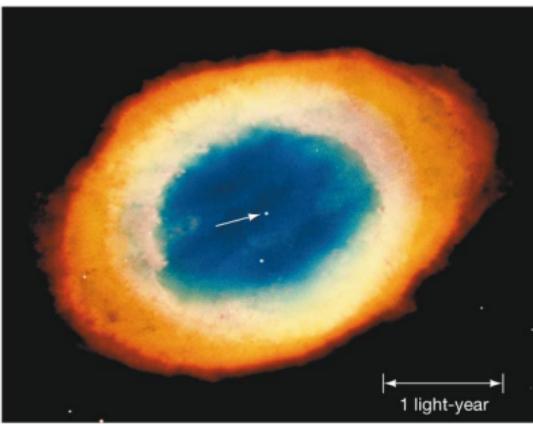
# Evolución Solar: Nebulosa Planetaria



(a)



(b)



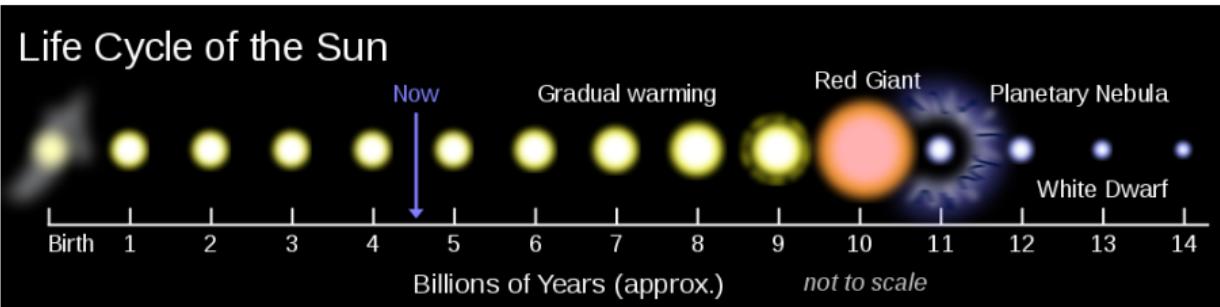
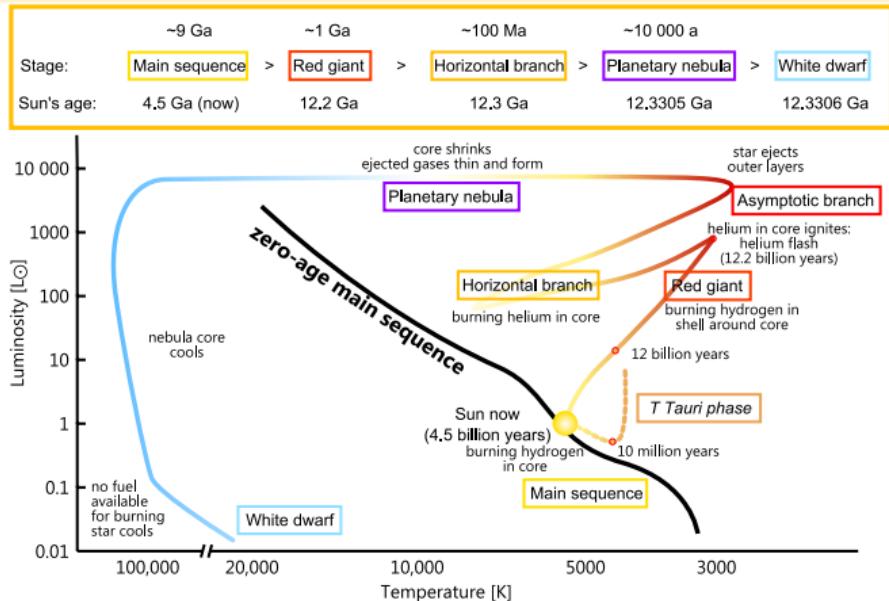
(c)

# Evolución Solar

Evolution of a Sun-like Star							
Stage	Approximate Time to Next Stage (Yr)	Central Temperature ( $10^6$ K)	Surface Temperature (K)	Central Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Radius (km)	(solar radii)	Object
7	$10^{10}$	15	6000	$10^5$	$7 \times 10^5$	1	Main-sequence star
8	$10^8$	50	4000	$10^7$	$2 \times 10^6$	3	Subgiant branch
9	$10^5$	100	4000	$10^8$	$7 \times 10^7$	100	Helium flash
10	$5 \times 10^7$	200	5000	$10^7$	$7 \times 10^6$	10	Horizontal branch
11	$10^4$	250	4000	$10^8$	$4 \times 10^8$	500	Asymptotic-giant branch
12	$10^5$	300	100,000	$10^{10}$	$10^4$	0.01	Carbon core
	—	—	3000	$10^{-17}$	$7 \times 10^8$	1000	Planetary nebula*
13	—	100	50,000	$10^{10}$	$10^4$	0.01	White dwarf
14	—	Close to 0	Close to 0	$10^{10}$	$10^4$	0.01	Black dwarf

\*Values refer to the envelope.

# Síntesis de la Evolución del Sol

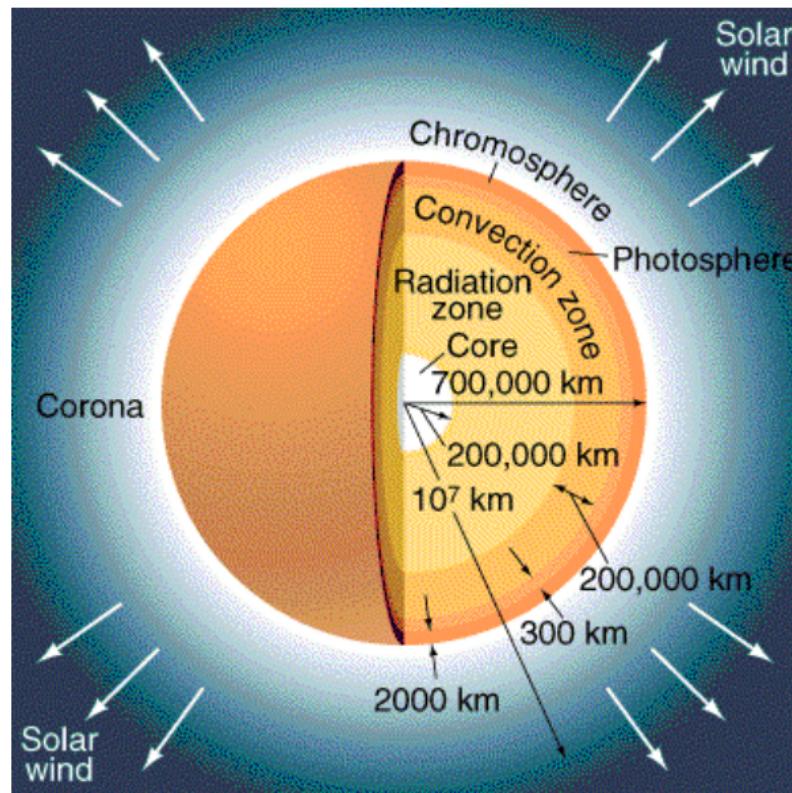


## 4. Anatomía del Sol

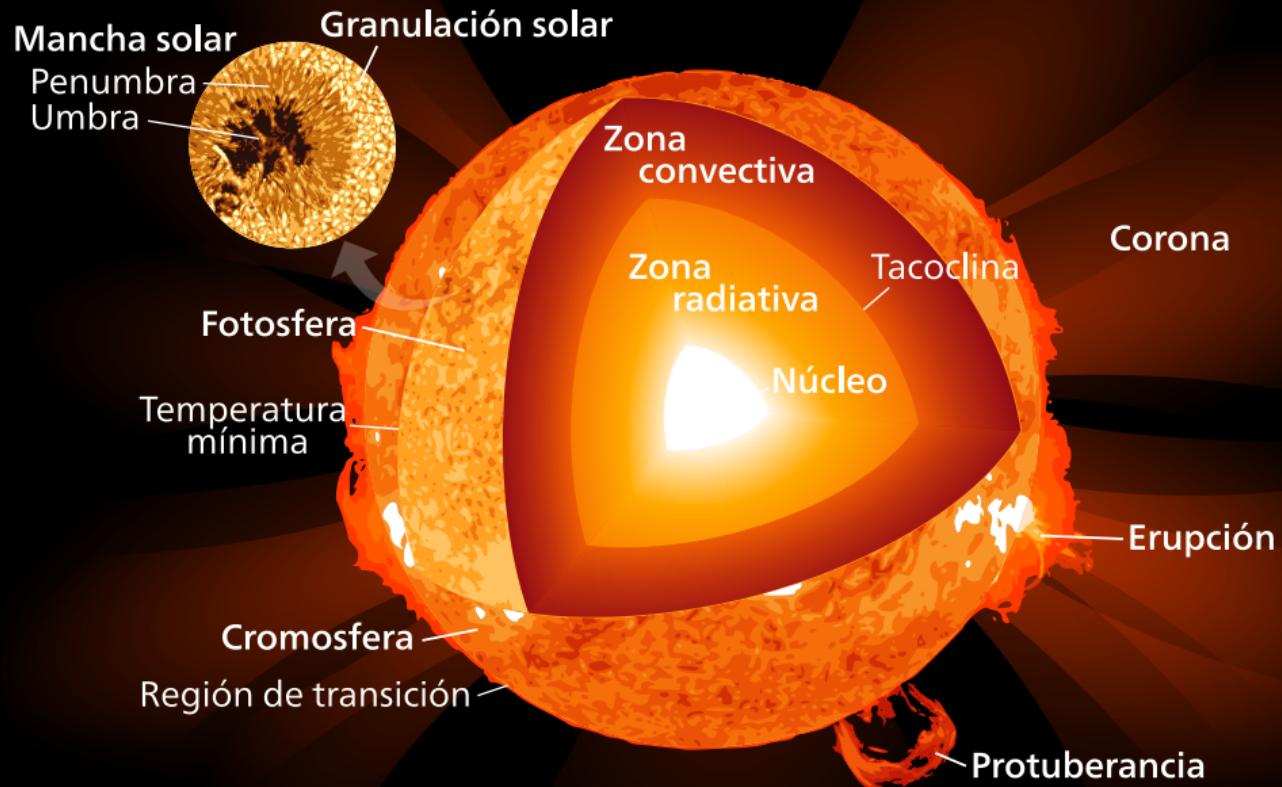
# Estructura del Sol

El Sol se puede dividir en 6 regiones basados en las características físicas de estas regiones (pero las fronteras entre las regiones no son claras)

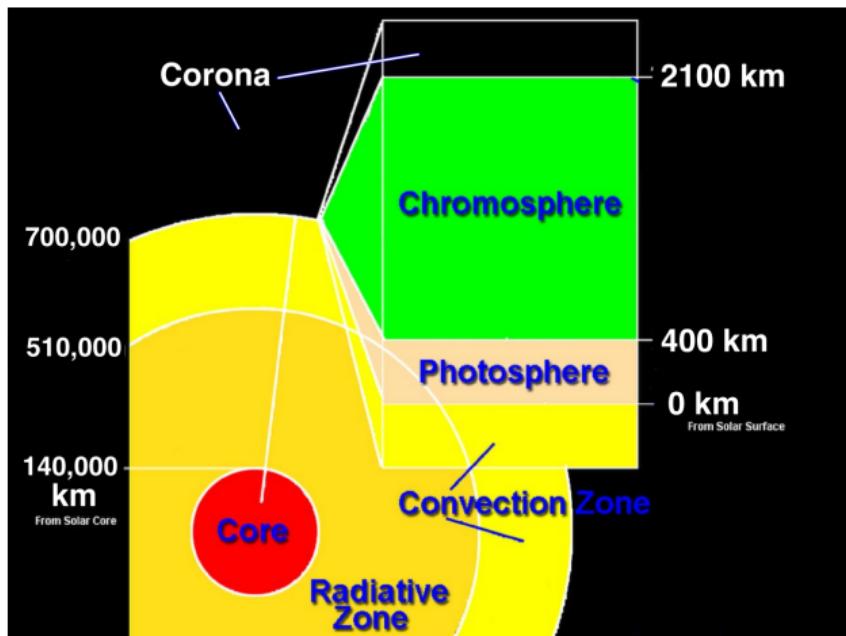
- ① **Núcleo:** región donde se produce la energía del sol; debido a la fusión nuclear
- ② **Zona Radiativa:** zona donde la energía es transportada por un flujo de radiación
- ③ **Zona Convectiva:** región donde el transporte de la energía se produce por celdas de convección
- ④ **Fotósfera:** la "superficie" del Sol; una fina capa en el cual los fotones son emitidos
- ⑤ **Cromósfera:** una capa fina; la "atmósfera" del Sol
- ⑥ **Corona:** región super-caliente pero muy tenue donde se origina el viento solar



# Estructura del Sol



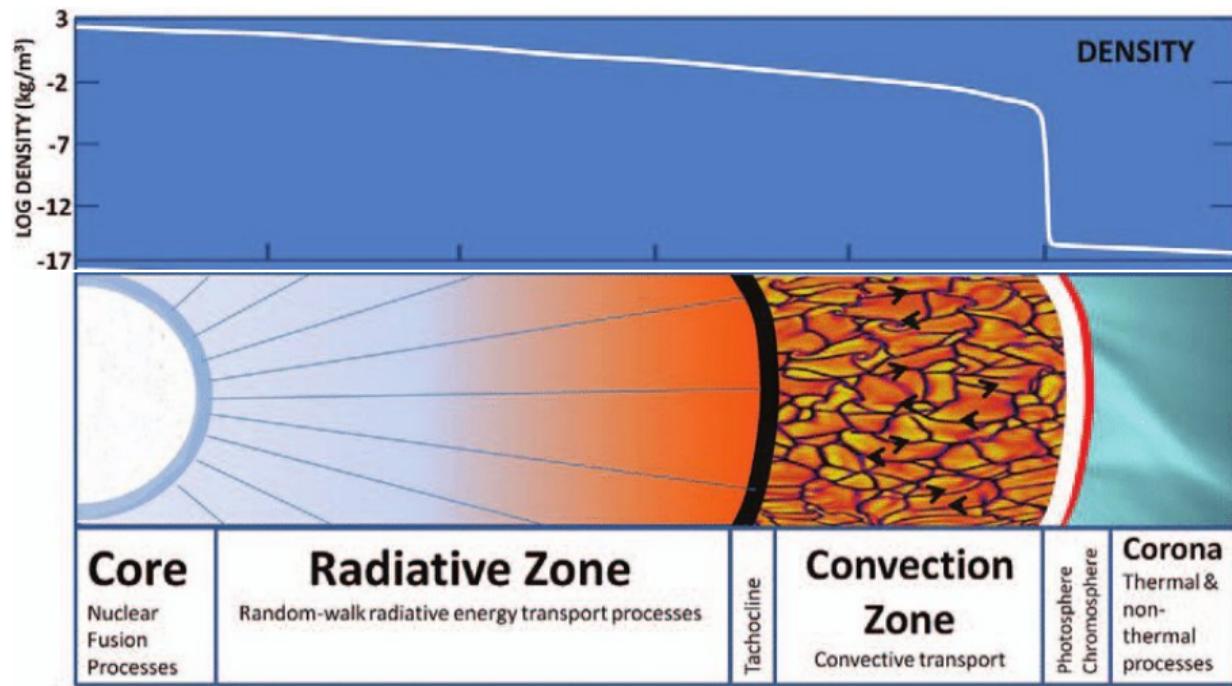
# Estructura del Sol



Layer	Temperature
Core	15,000,000 °C
Radiation zone	2,000,000 °C to 7,000,000 °C
Convection zone	2,000,000 °C
Photosphere	4,125 °C to 6,125 °C
Chromosphere	19,725 °C
Corona	500,000 °C to 6,000,000 °C

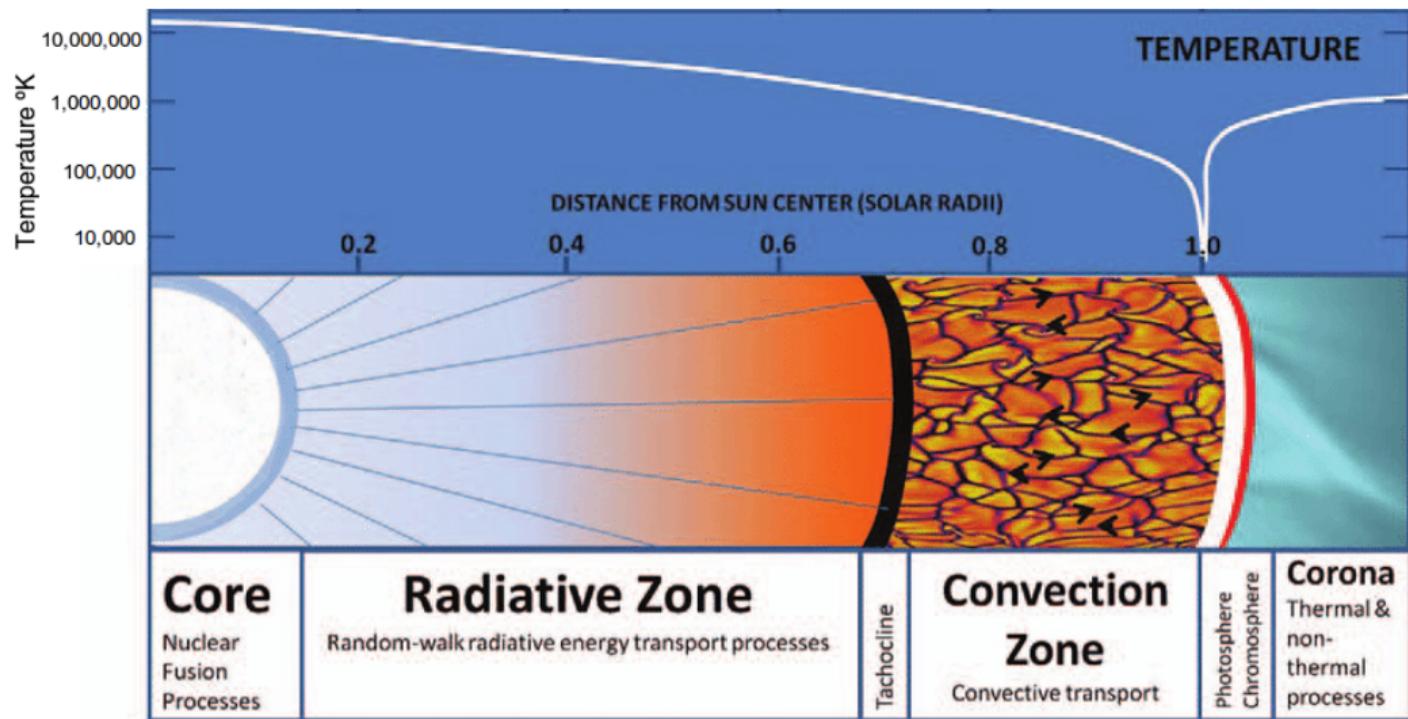
- La Fotósfera y la Cromósfera son dos capas muy finas en comparación con el resto de las zonas
- La Corona solar se extiende hasta la Tierra y más allá.

# Densidad en las distintas regiones del sol



- La densidad decrece a medida que nos alejamos de núcleo
- En la zona de la fotósfera (la "superficie" del Sol), la densidad desciende abruptamente
- Densidad:  $\sim 1.4 \text{ g/cm}^3$  (promedio global)  $\sim 162 \text{ g/cm}^3$  (núcleo)

# Temperaturas en las distintas regiones del sol



- La temperatura del Sol es máxima en su núcleo: 15.700.000°K
- La temperatura es mínima en su "superficie" (la fotósfera): 5.772°K
- La atmósfera del Sol (cromósfera y corona) tiene temperaturas de millones de °K!

## 4. Anatomía del Sol

### 4.1. Interior Solar

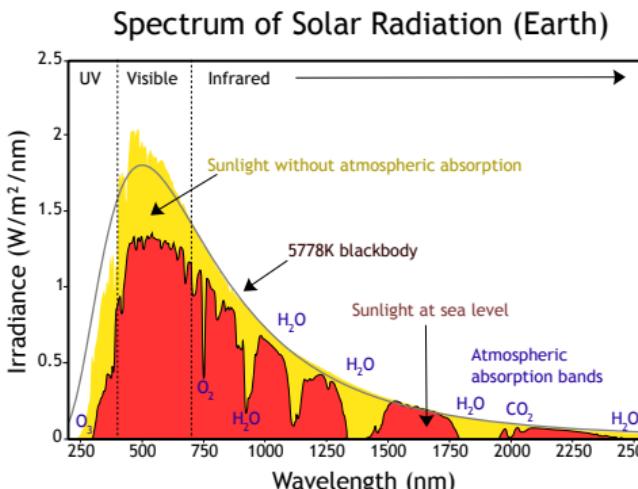
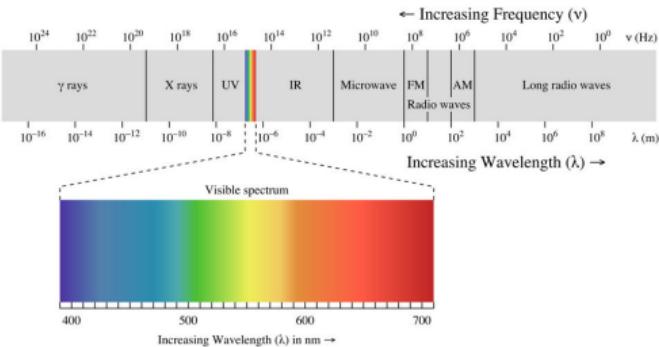
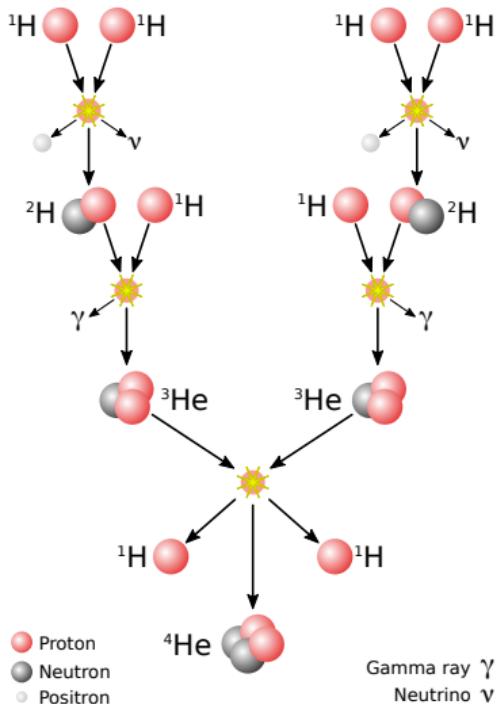
Núcleo Solar

# El Núcleo del Sol

- Nucleo

- En el núcleo las presiones son enormes (260,000,000,000 veces más grande que la presión atmosférica en la Tierra)
- La temperatura alcanza 15.000.000°K
- El Hidrógeno queda totalmente ionizado; separando el protón del electrón, formando un plasma
- Los protones están tan cerca entre ellos que se fusionan para dar lugar a un núcleo de Helio
- Mediante un mecanismo bastante complicado los núcleos de Hidrógeno se fusionan para dar lugar a núcleos de Helio, en este proceso se libera energía ( $E = mc^2$ )
- Cada segundo 700 millones de toneladas de Hidrógeno son convertidas en 695 millones de toneladas Helio
- La fusión ocurre dentro del núcleo y esta energía calienta las zonas cercanas al núcleo, pero no lo suficiente como para que se produzca fusión en esas zonas.

# Fusión Nuclear en el Interior del Sol



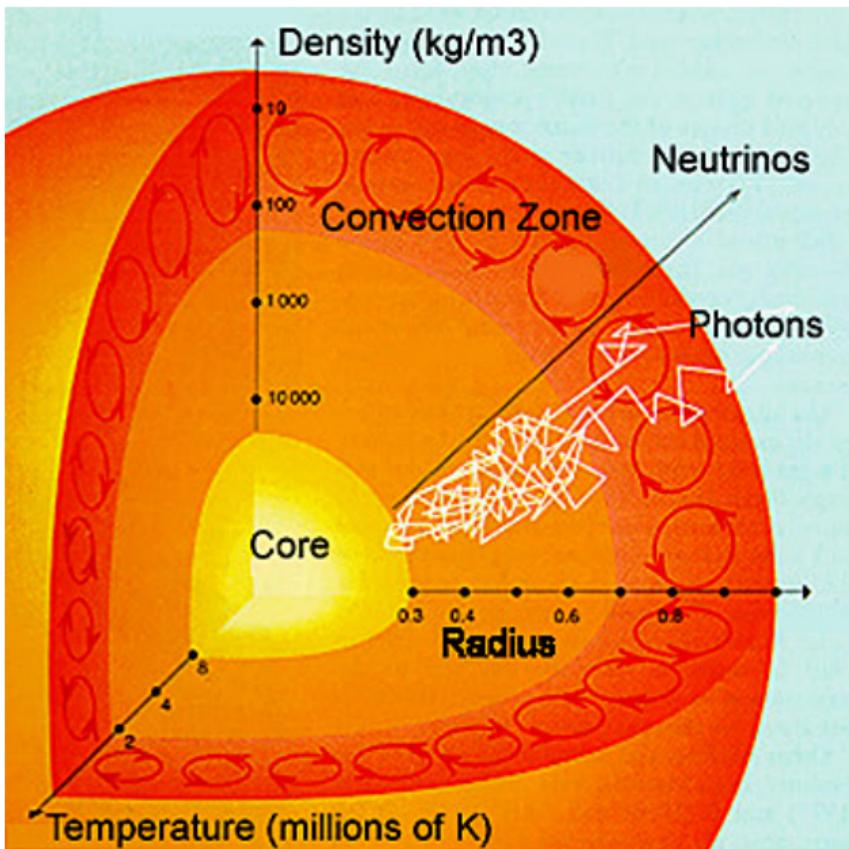
- La fusión en el núcleo genera fotones gamma y neutrinos

## 4. Anatomía del Sol

### 4.1. Interior Solar

Zona Radiativa

# Fusión Nuclear en el Interior del Sol



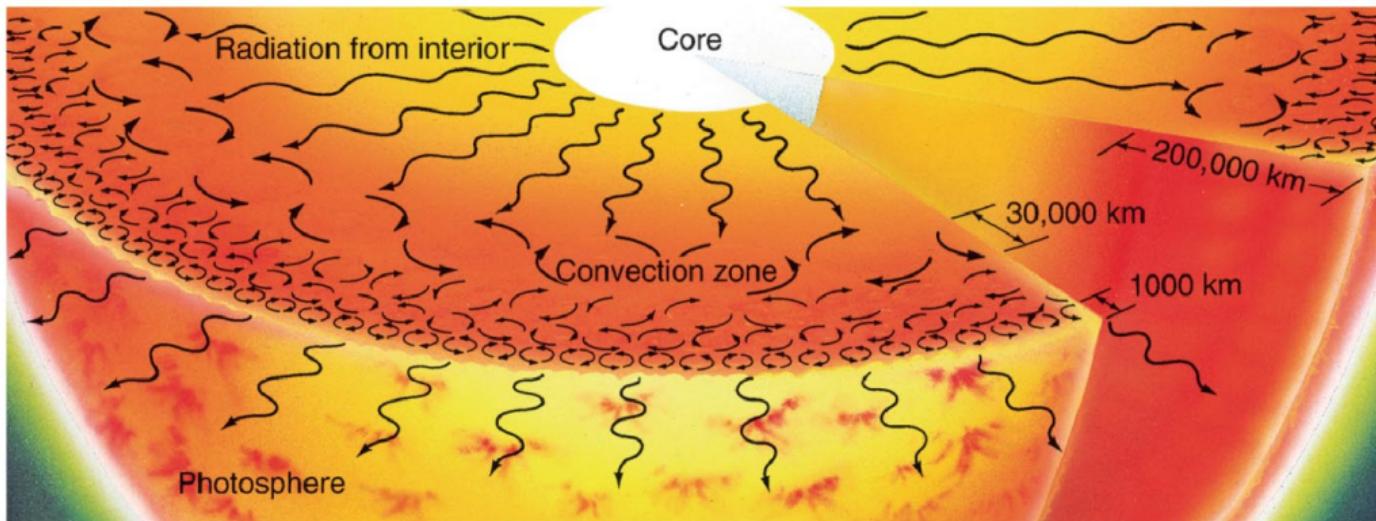
- Los fotones de alta energía producidos en la fusión ("rayos gamma") no pueden salir del Sol inmediatamente ya que chocan con electrones y son re-emitidos en otras direcciones (y a menor energía)
- La reacción de fusión también produce neutrinos; partículas extremadamente ligeras que no interactúan con la materia (y escapan el Sol inmediatamente)

## 4. Anatomía del Sol

### 4.1. Interior Solar

Zona Convectiva

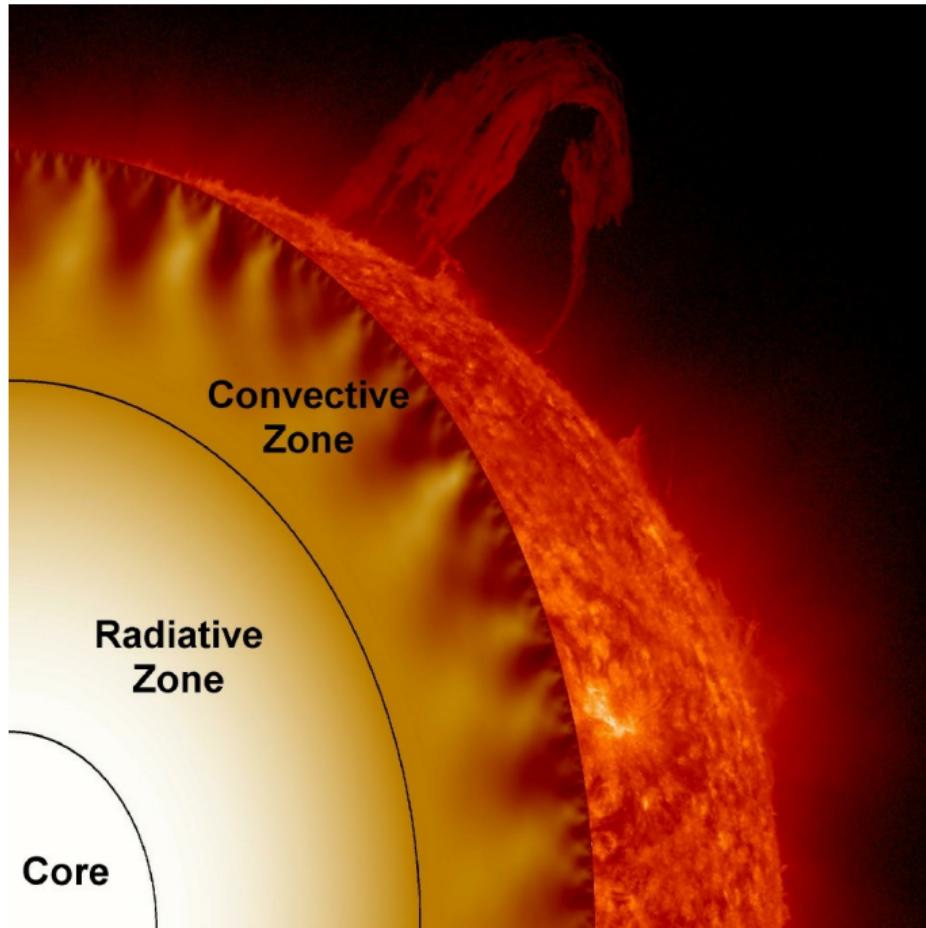
# Zona Convectiva



- Zona Convectiva

- En esta zona el plasma se mueve de manera organizada generada por la convección
- Las celdas de convección son largas columnas de plasma en movimiento que transportan la energía del núcleo hacia afuera, el plasma enfriado vuelve a sumergirse hacia el interior generando un movimiento cíclico.
- La parte superior de las celdas de convección se pueden ver en la superficie del Sol

# Zona Convectiva

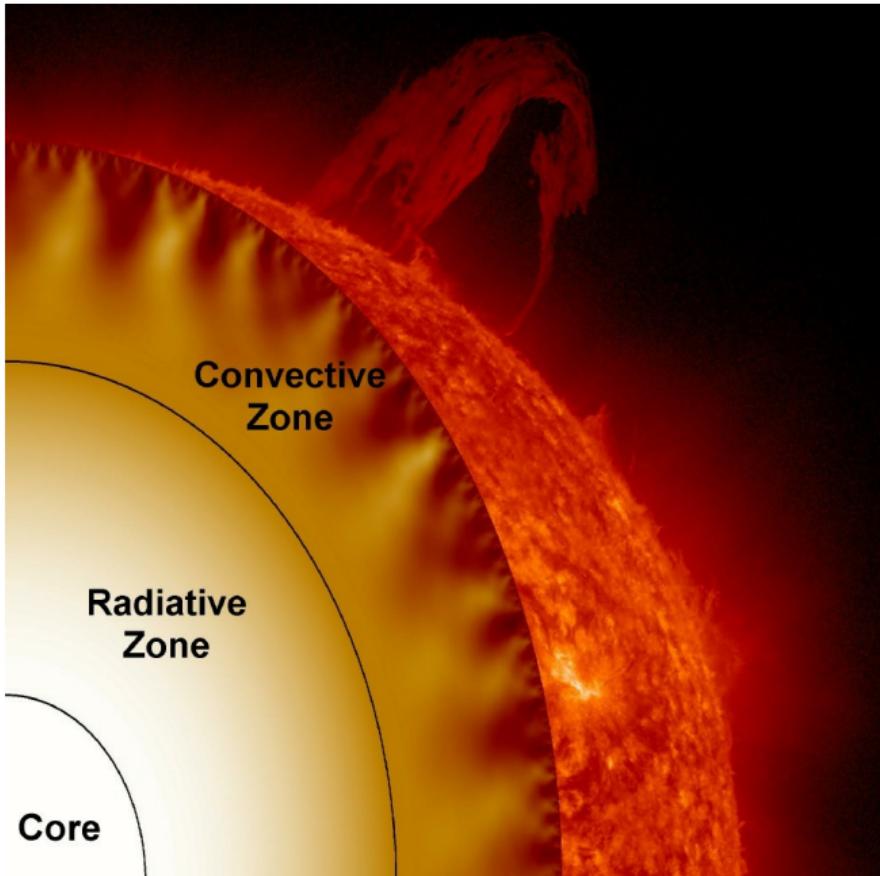


## 4. Anatomía del Sol

### 4.2. Atmósfera Solar

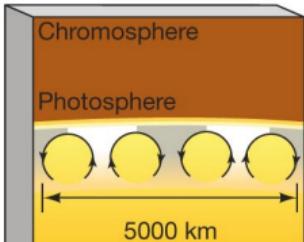
Fotósfera Solar

# Fotósfera Solar

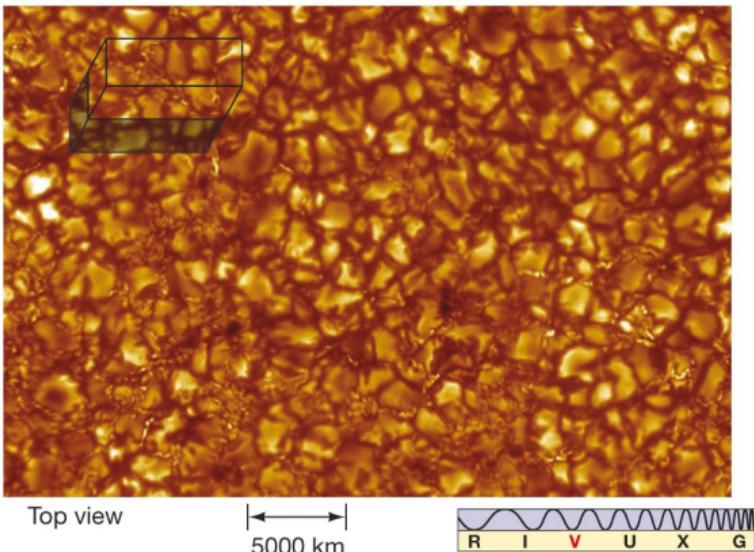


- Encima de la zona convectiva hay una fina capa llamada la fotosfera
- La densidad del material se suficientemente baja y se transforma en transparente (la luz puede moverse libremente a través de esta capa)
- Esta es la luz que vemos al mirar al Sol
- El Sol es gaseoso y por lo tanto no tiene una superficie sólida como los planetas rocosos. Sin embargo, el gas en la fotosfera baja de densidad tan rápidamente que se puede pensar como la "superficie" del Sol

# Fotósfera: Granulación



Side view

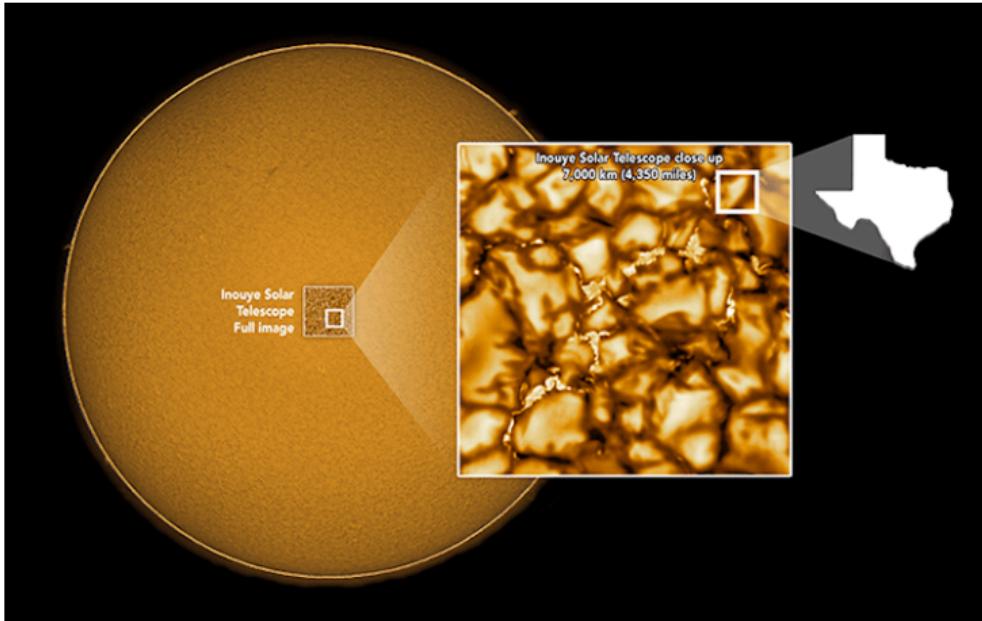
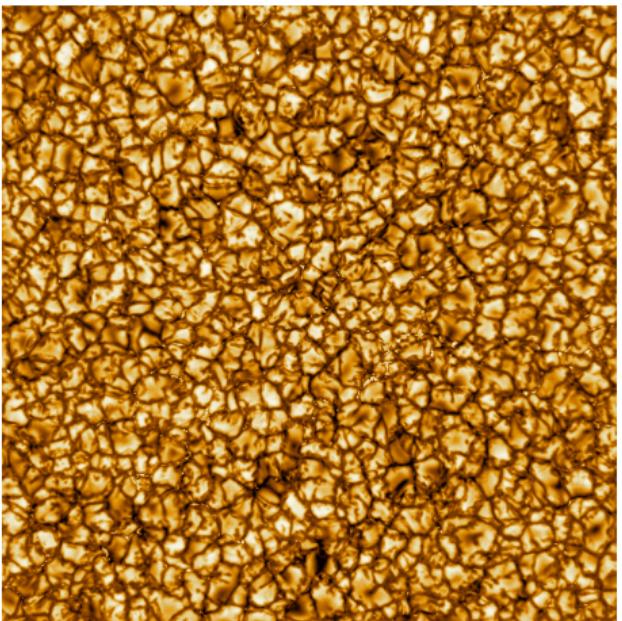


Top view

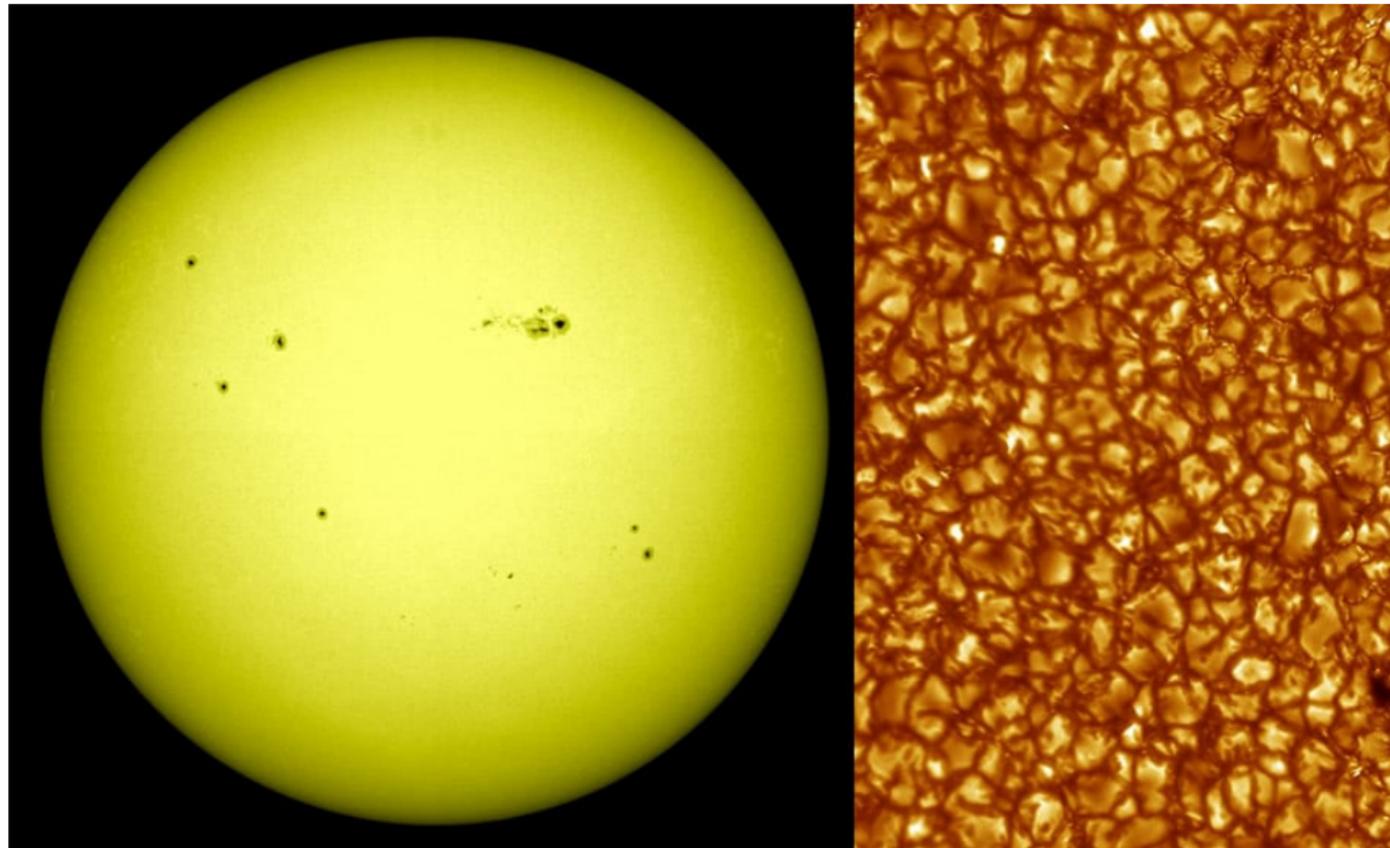
5000 km

R I V U X G

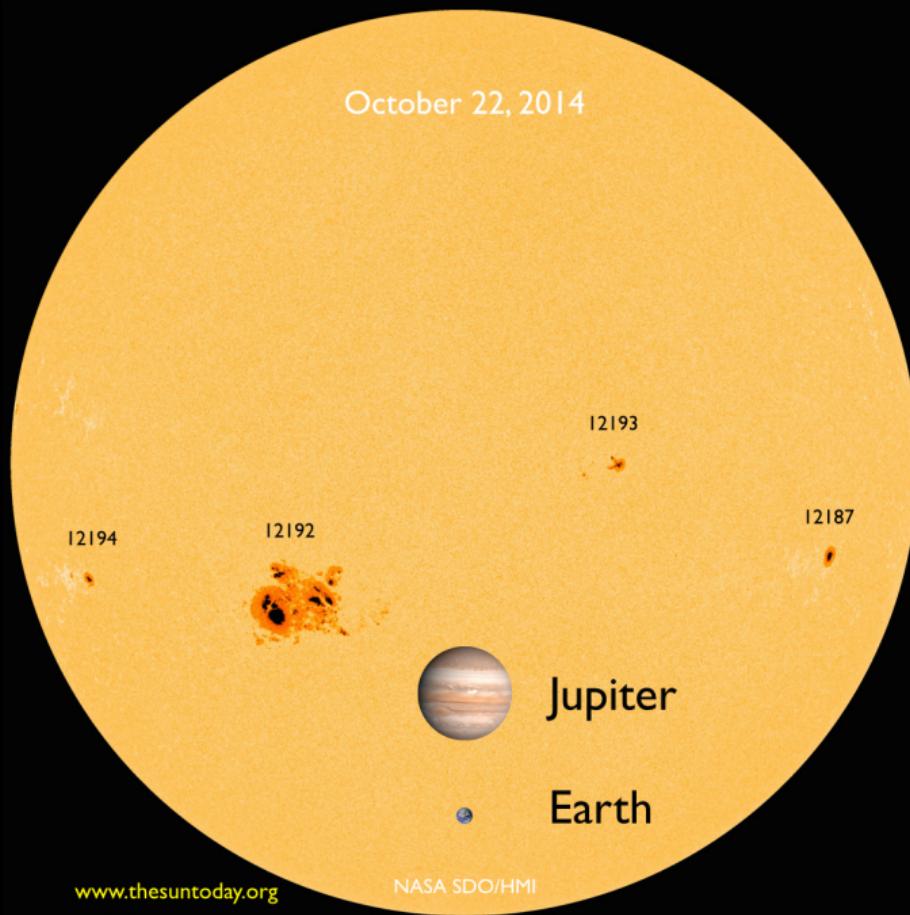
# Fotósfera: Granulación



# Fotósfera: Manchas Solares y Granulación



# Fotósfera: Manchas Solares

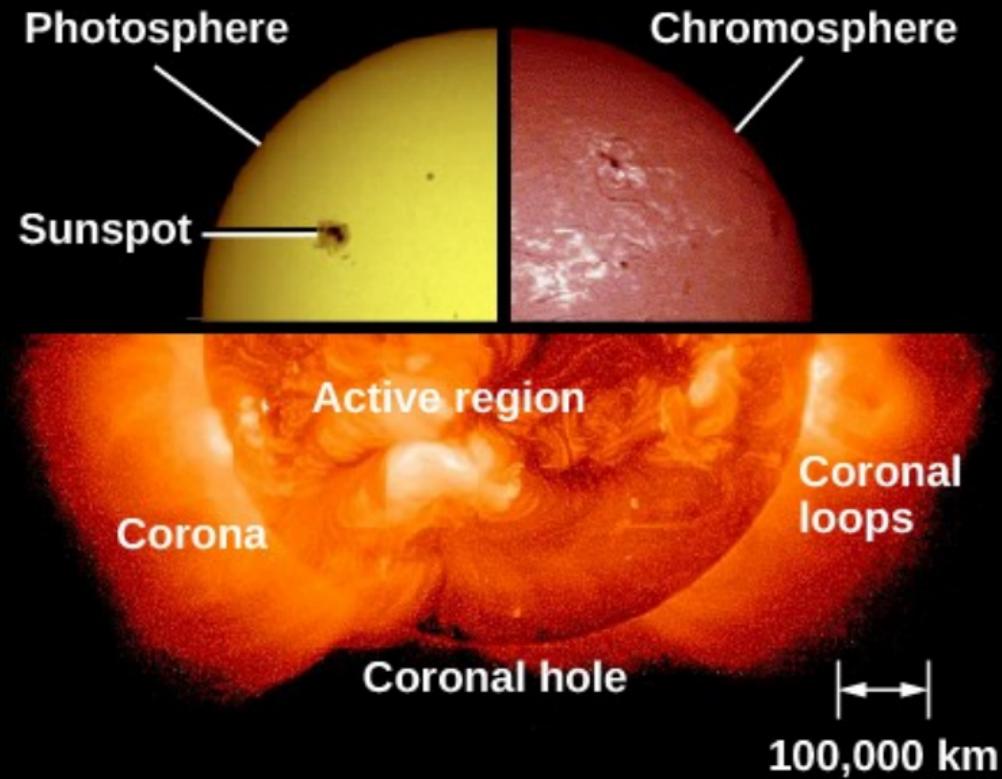


## 4. Anatomía del Sol

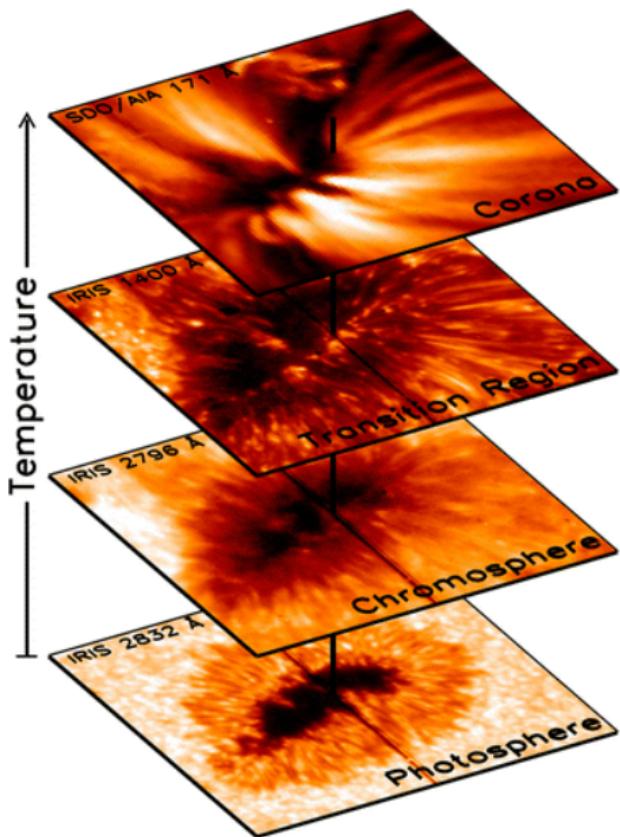
### 4.2. Atmósfera Solar

Cromósfera Solar

# La Cromósfera solar



# La Cromósfera solar



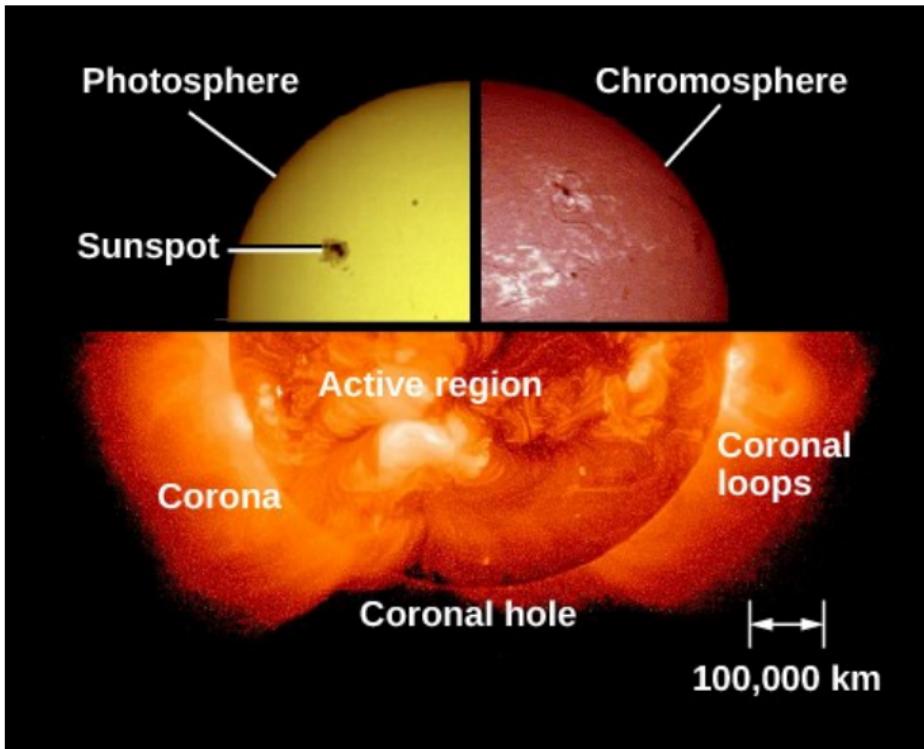
- La Cromósfera es más dinámica que la fotósfera
- En esta zona de observan las llamadas **regiones activas** que pueden estar conectadas con manchas solares en la fotósfera.
- En esta capa también se observan las **fulguraciones** ("erupciones" o "llamaradas" solares)

## 4. Anatomía del Sol

### 4.2. Atmósfera Solar

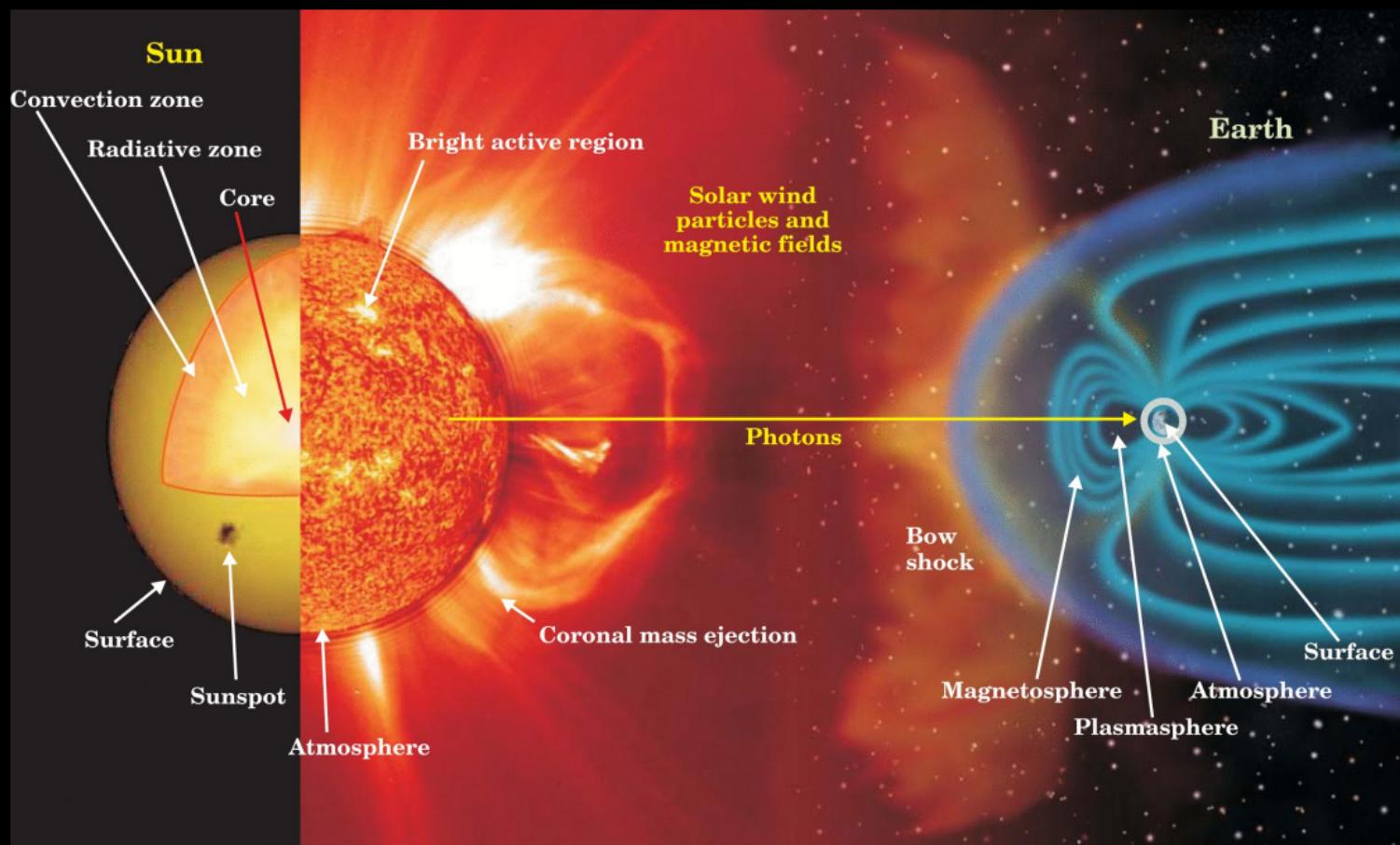
Corona Solar

# Corona Solar (la atmósfera exterior del Sol)

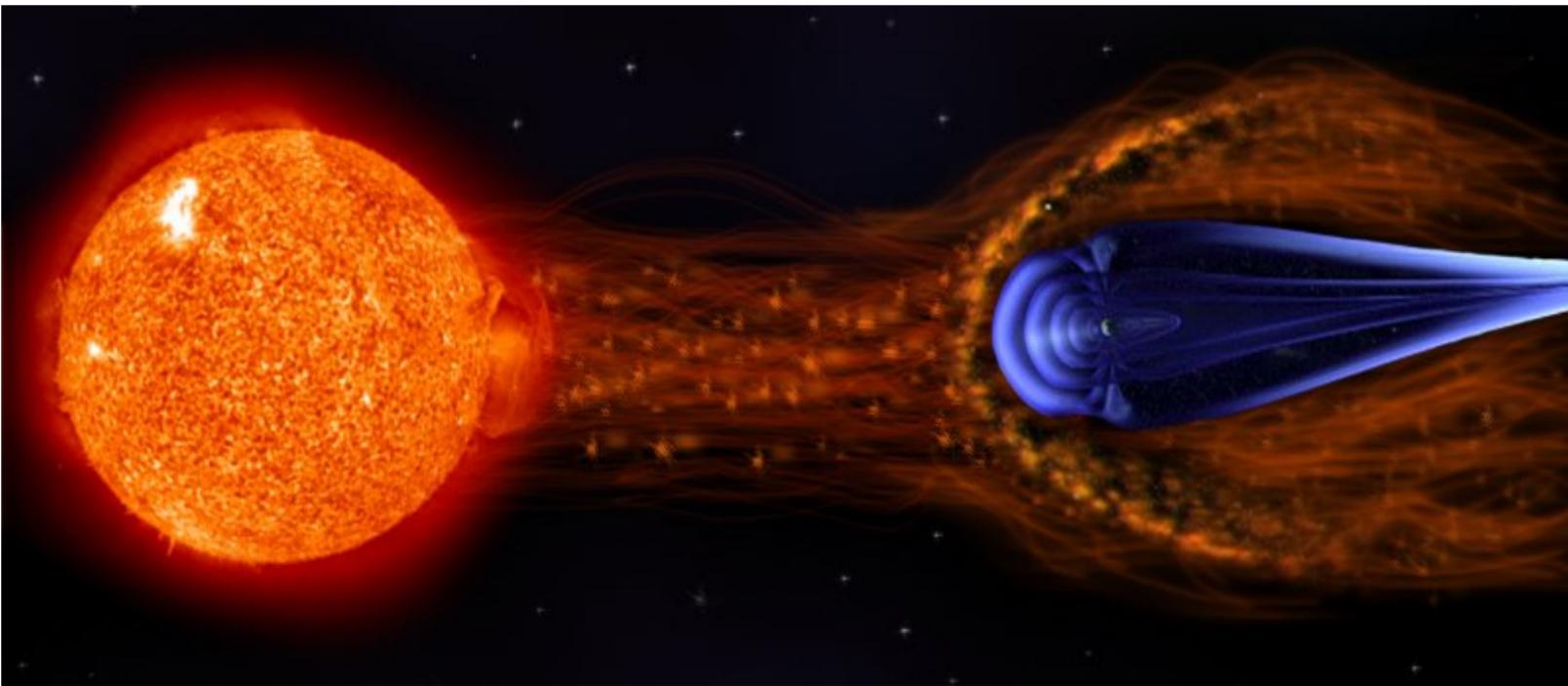


- La Corona es la zona que está por encima de la fotósfera
- Es mucho menos densa todavía que la fotósfera (menos de 1%)
- A diferencia de la fotófera está muy caliente, llegando a más de 1.000.000 grados
- La corona es tan tenue que solo puede ser vista durante eclipses de Sol o con telescopios especiales
- La corona no tiene una extensión precisa, se fusiona con el llamado viento solar:

# La Corona solar y la Tierra

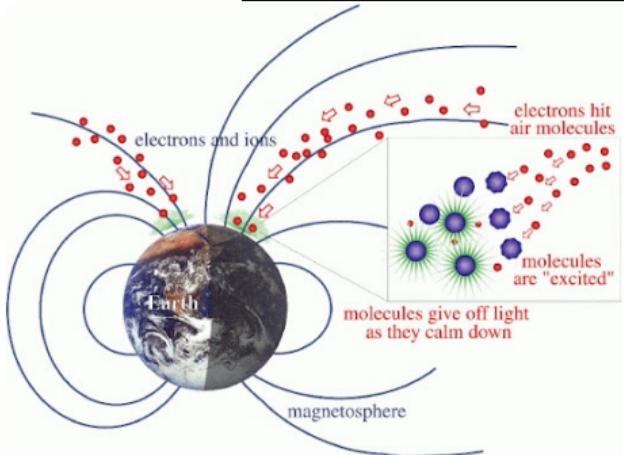
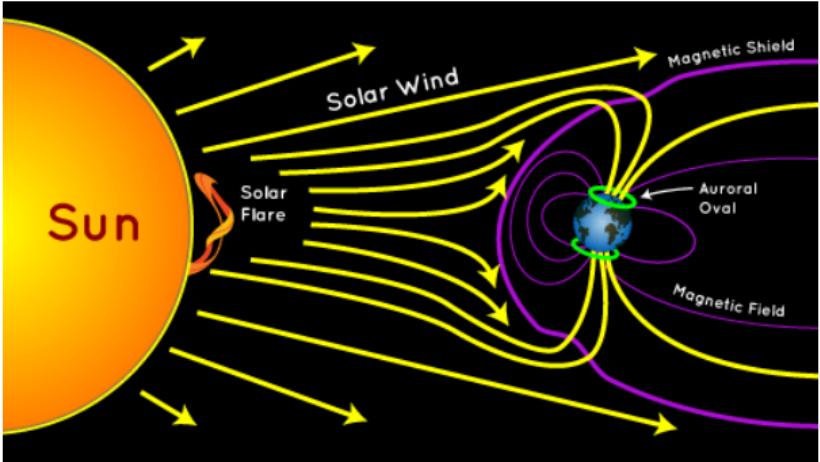


# Viento Solar

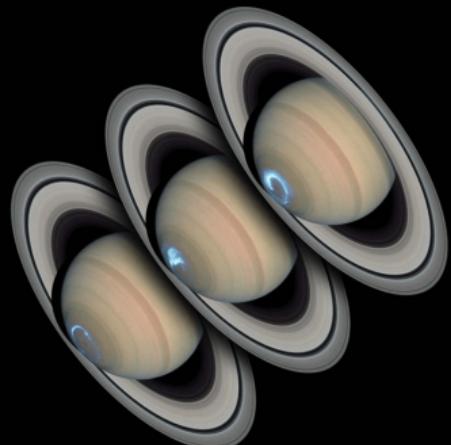
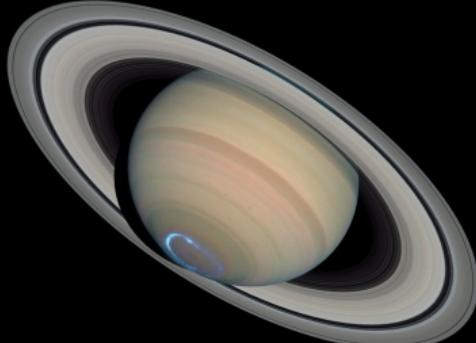
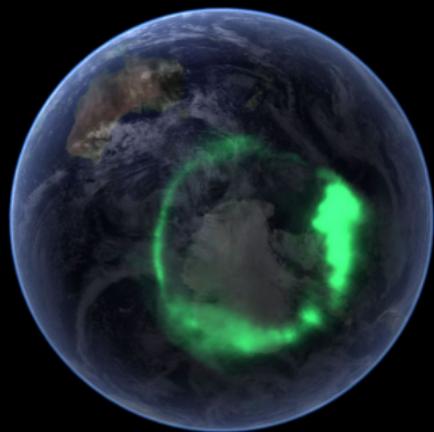


- El viento solar es una corriente de partículas cargadas que se liberan desde la corona solar.
- Este plasma consiste principalmente en electrones, protones (=núcleos de Hidrógeno) y partículas alfa (=núcleos de Helio)

# Auroras Solares



# Auroras Solares en la Tierra y en Otros Planetas

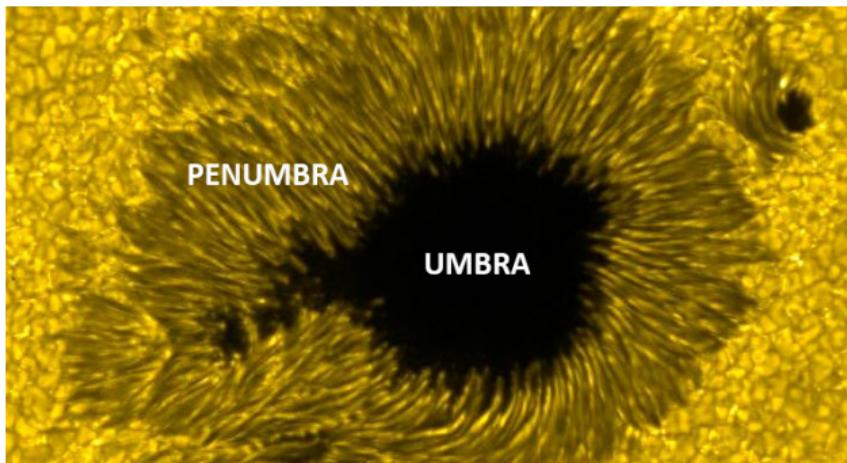
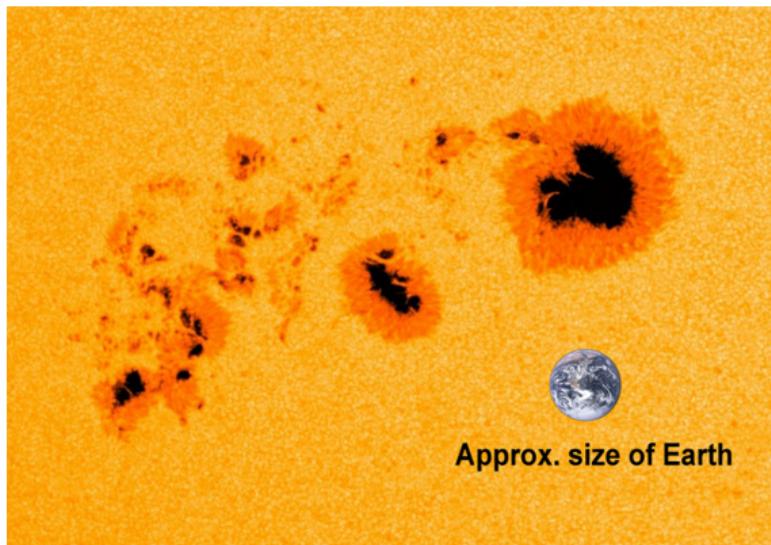


## 5. Manchas Solares y Zonas Activas

## 5. Manchas Solares y Zonas Activas

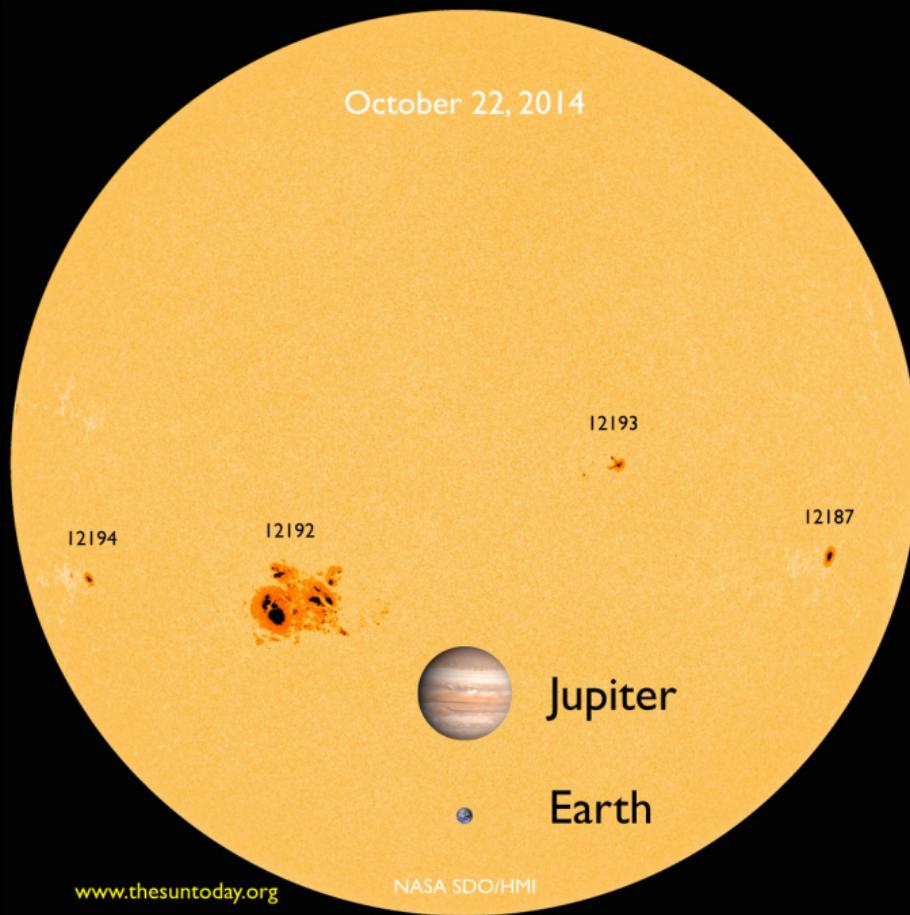
### 5.1. Descripción de las Manchas Solares

# Manchas Solares



- Las manchas solares son regiones de la fotósfera donde la temperatura es un poco más baja que en el resto de la superficie.
- Las manchas grandes tienen dos zonas: la umbra y la penumbra
- Las manchas solares suelen aparecer en pares
- Las más pequeñas, llamadas "poros", normalmente solo tienen umbra

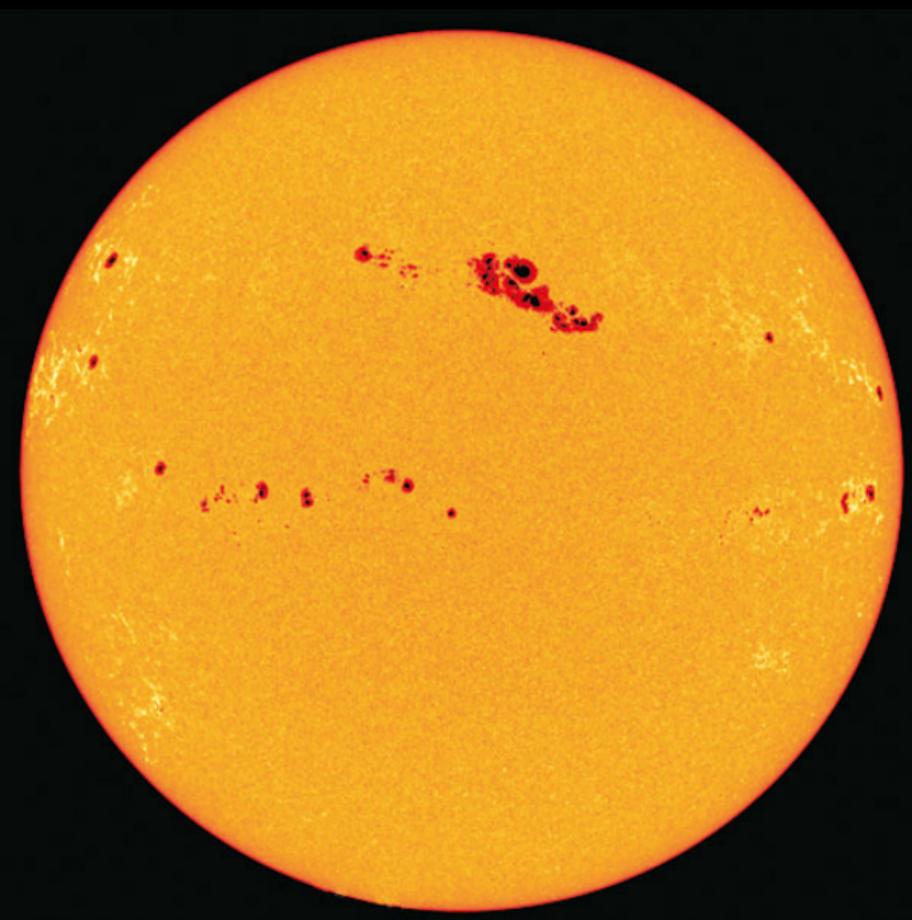
# El Tamaño de las Manchas Solares



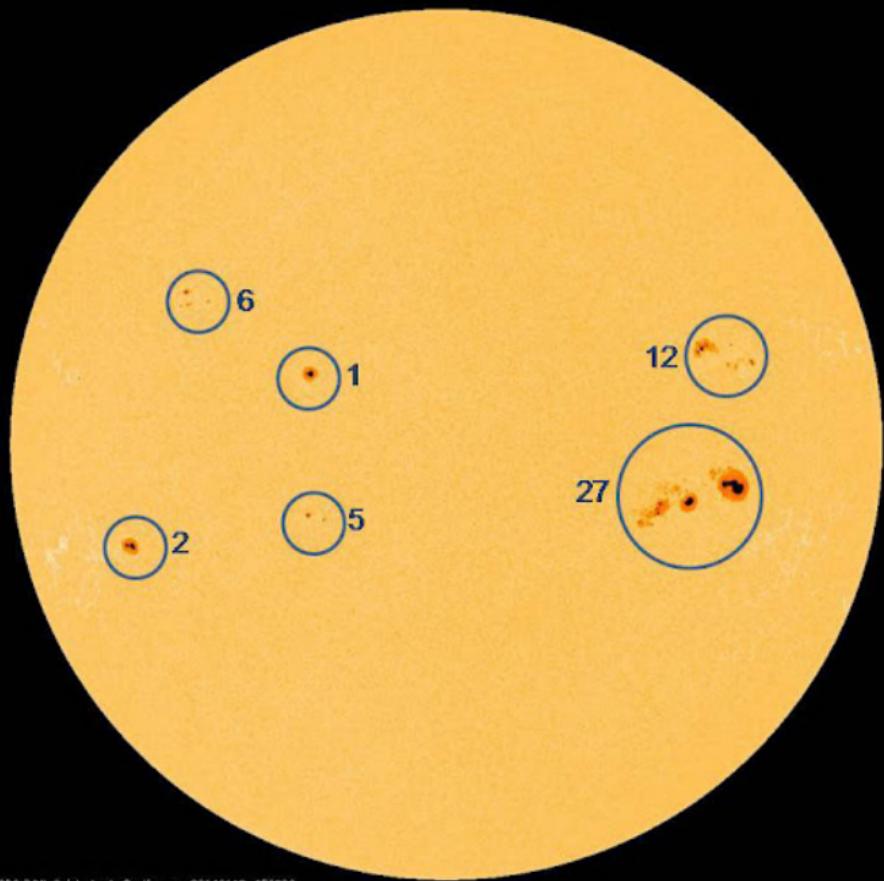
## 5. Manchas Solares y Zonas Activas

### 5.2. Variaciones de las Manchas Solares

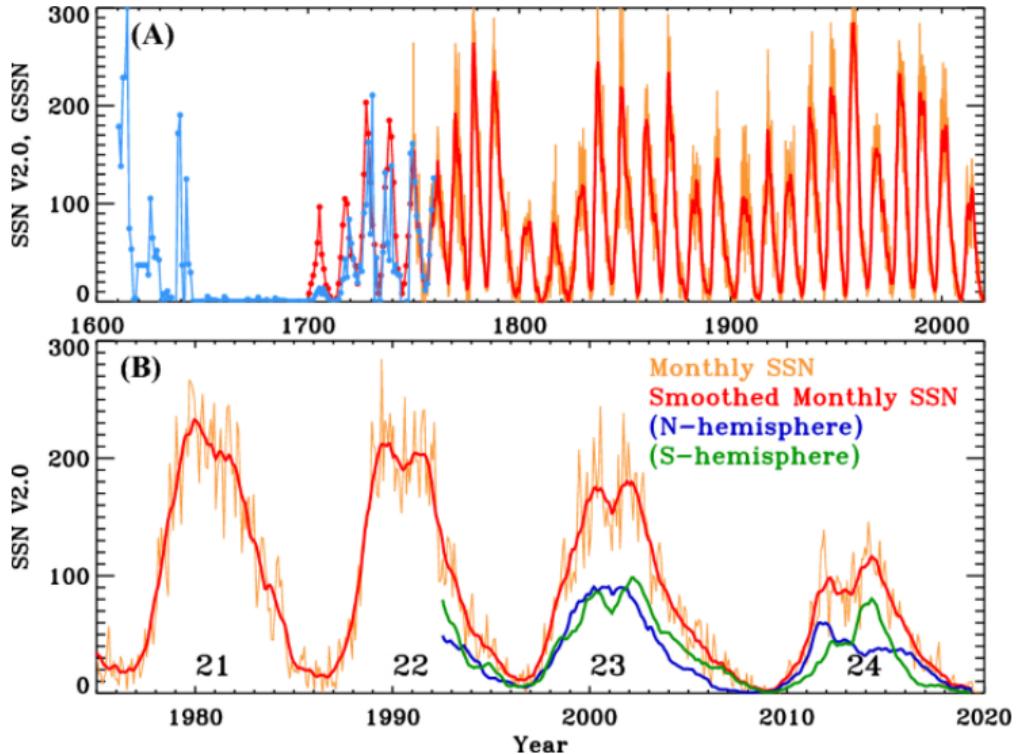
# Cantidad de Manchas Solares



# Contando la Cantidad y Tamaño de Manchas Solares

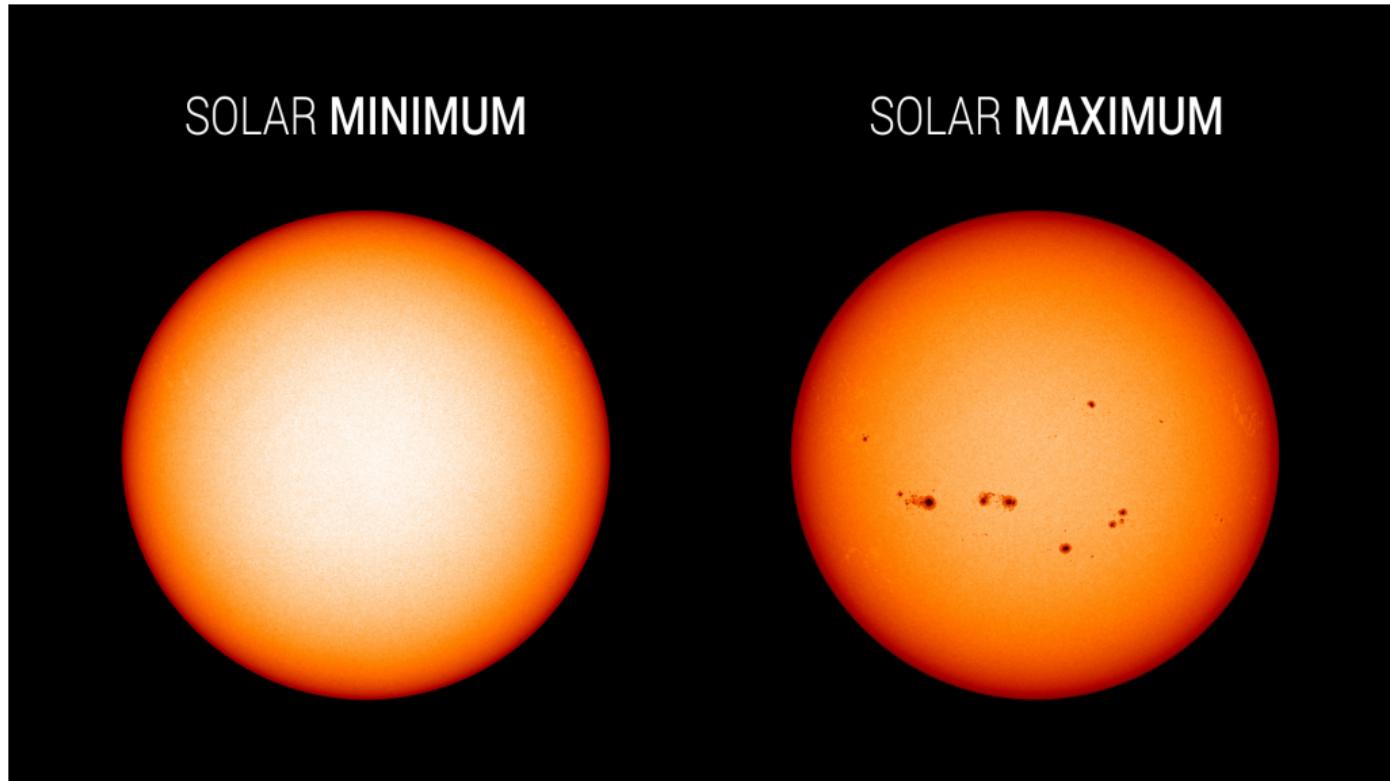


# Evolución de las Manchas Solares: período de 11 años



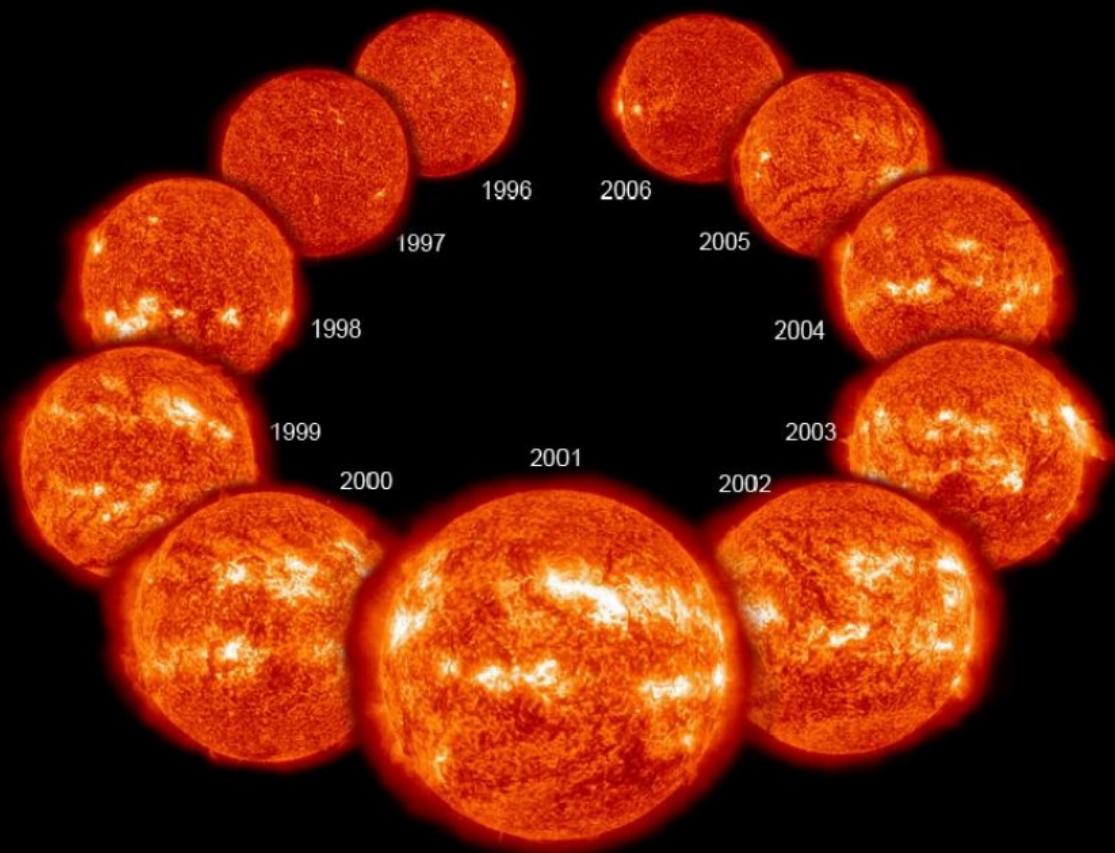
- La cantidad de manchas solares varía periódicamente entre un máximo y un mínimo en el cual prácticamente no se ven manchas solares
- El tiempo típico entre dos máximos (o mínimos) es de aproximadamente 11 años

# El Ciclo Solar



- Diferencia entre el mínimo y el máximo de la actividad solar ( $\sim 5,5$  años)

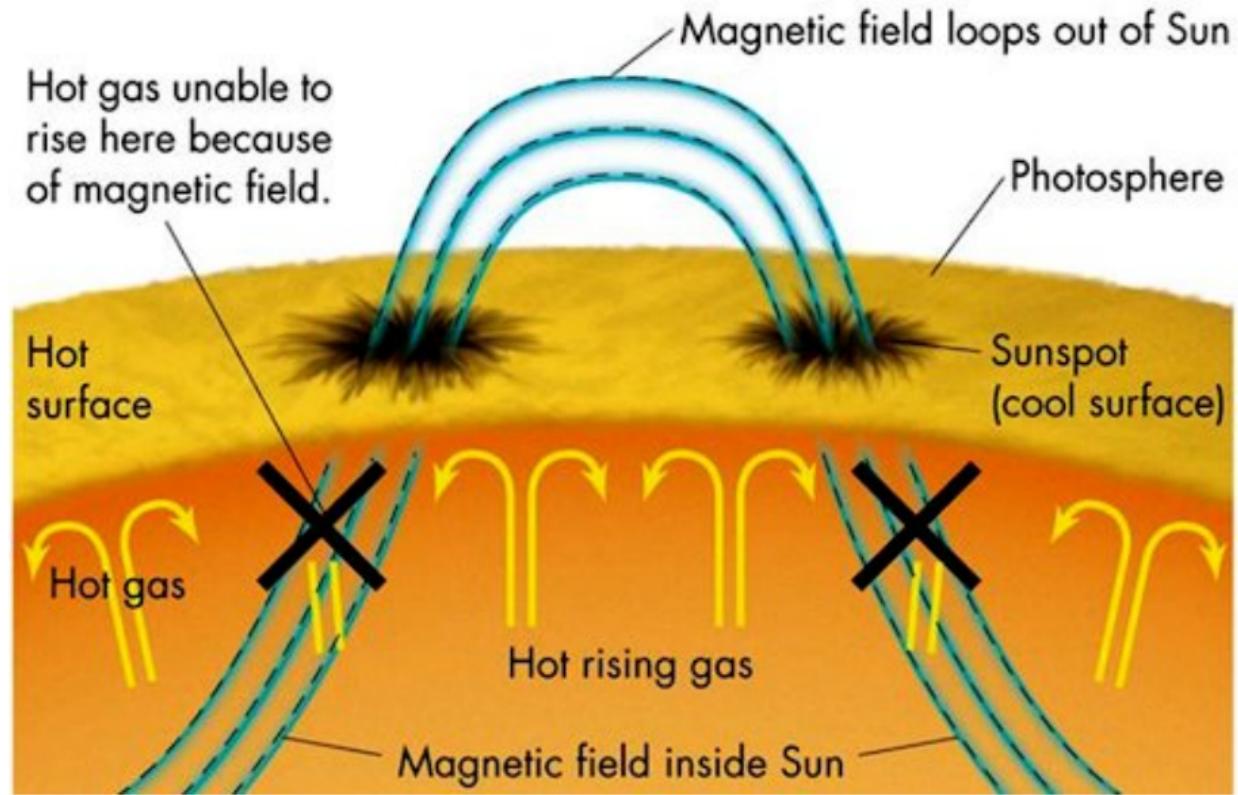
# El Ciclo Solar



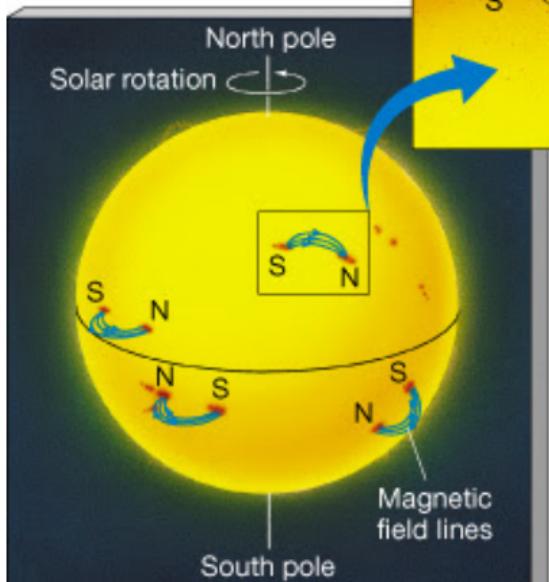
## 5. Manchas Solares y Zonas Activas

### 5.3. Mecanismo de las Manchas Solares

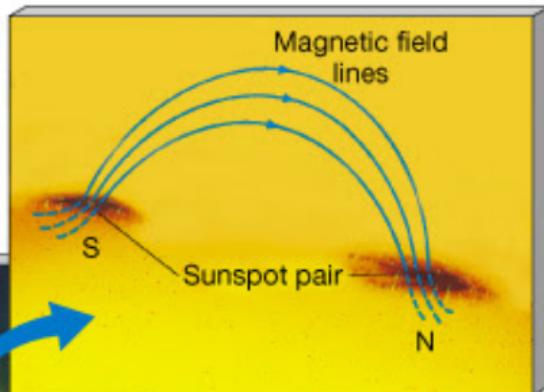
# Campo Magnético en una Zona Activa



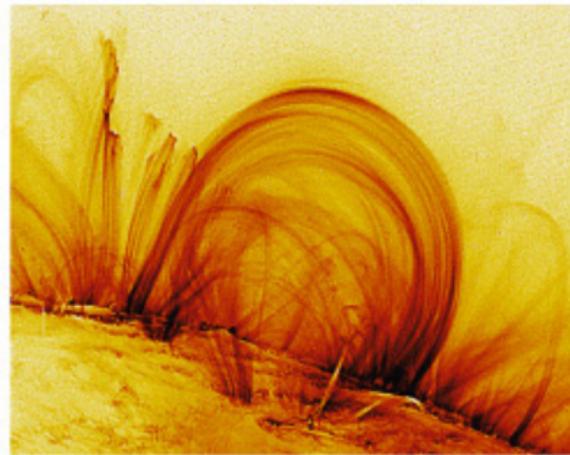
# Campo Magnético en una Zona Activa: Manchas Solares



(a)

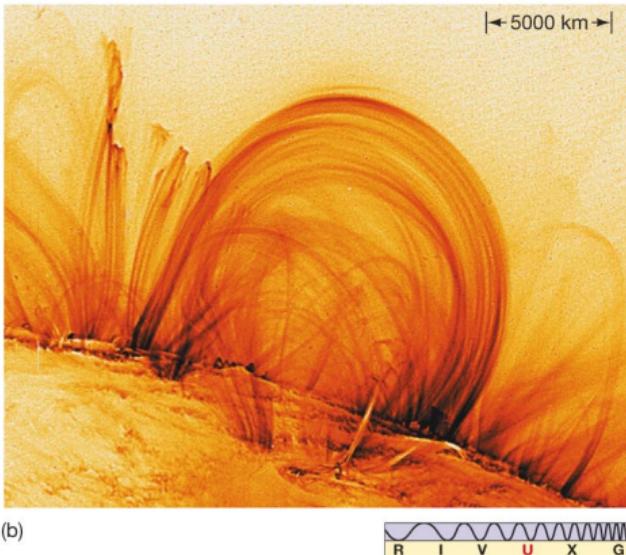
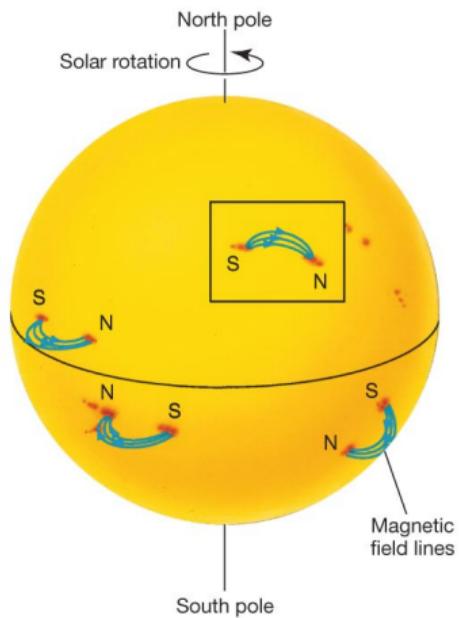


(b)

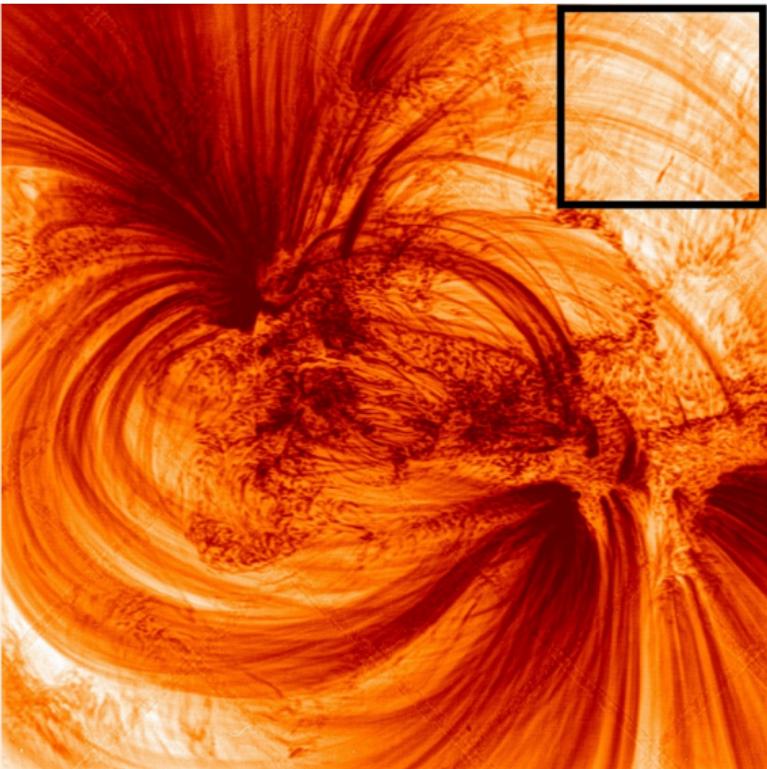
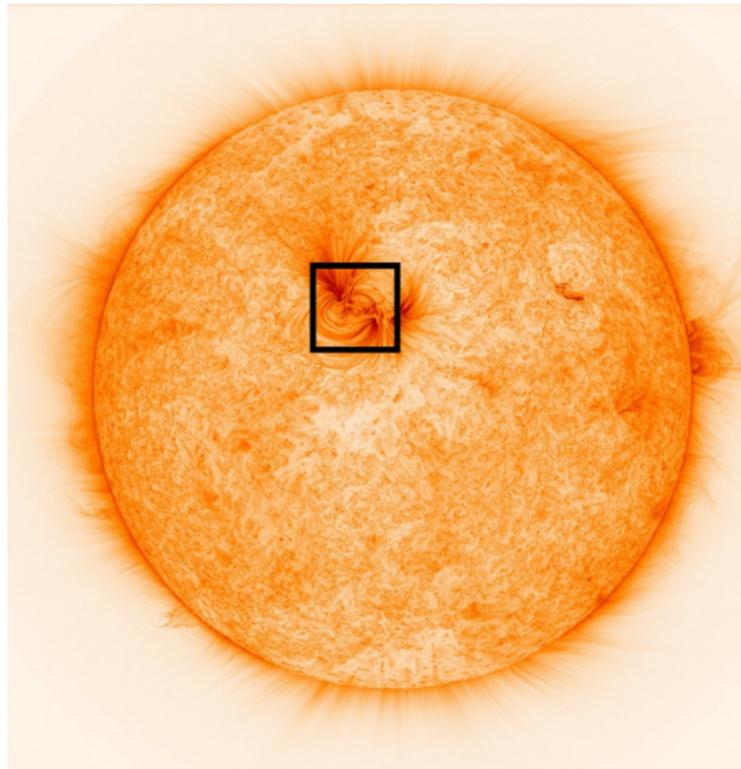


0.0000001 AU  
0.00000001 AU  
0.000000001 AU

# Campo Magnético en una Zona Activa

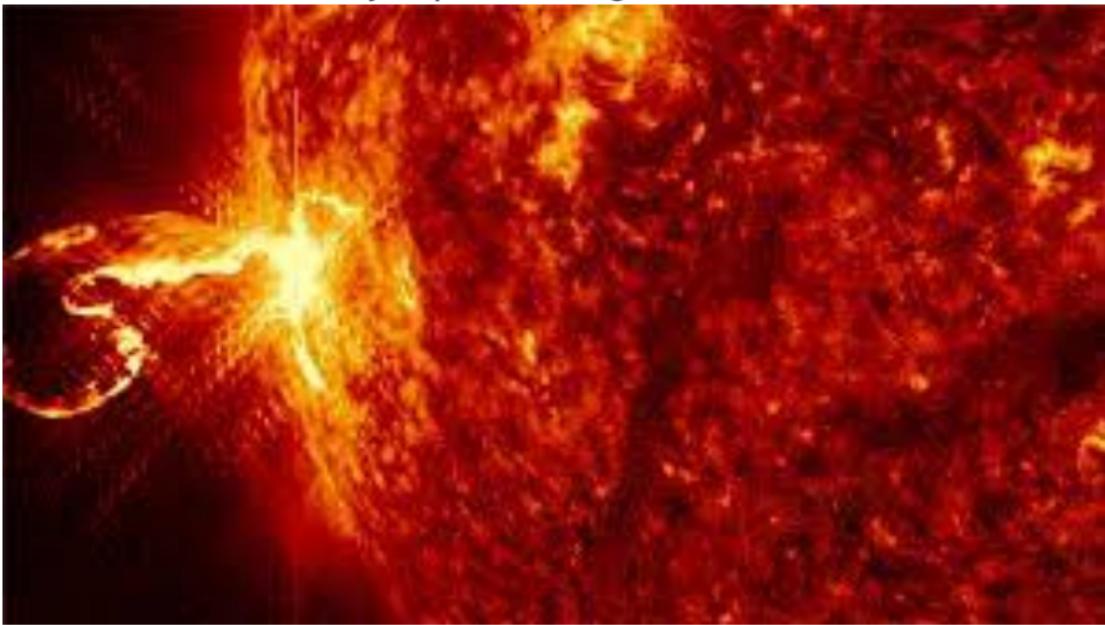


# Campo Magnético en una Zona Activa



# Fulguraciones y Eyecciones de Masa Coronal

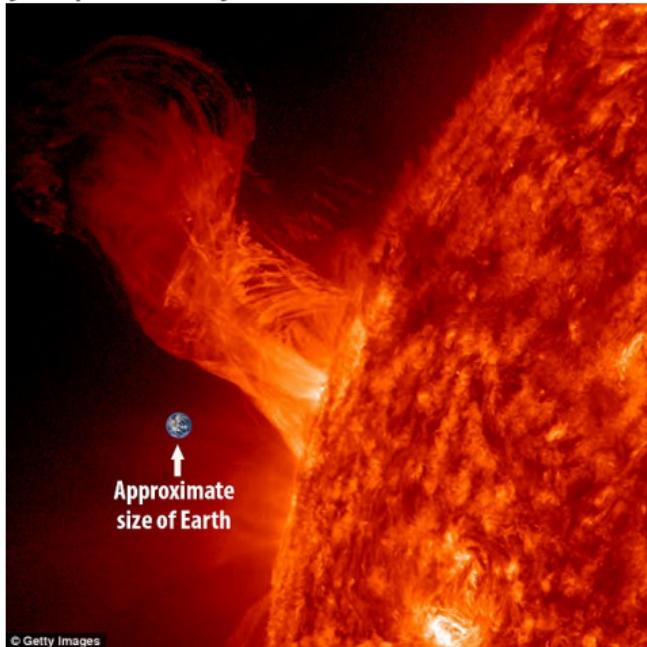
Ejemplo de Fulguración:



- Las fulguraciones y eyecciones de masa coronal se producen al reconectarse el campo magnético en una zona activa
- Pueden generar auroras en la atmósfera terrestre, apagones eléctricos y dañar satélites

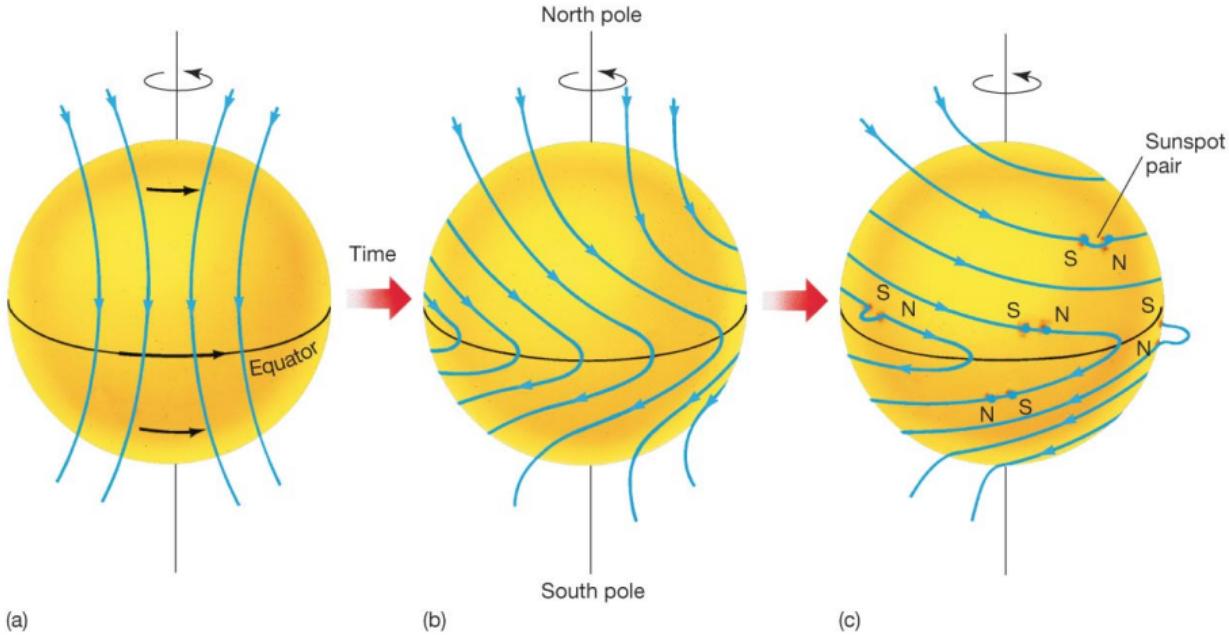
# Fulguraciones y Eyecciones de Masa Coronal

Ejemplo de Eyección de Masa Coronal:



- Las fulguraciones y eyecciones de masa coronal se producen al reconectarse el campo magnético en una zona activa
- Pueden generar auroras en la atmósfera terrestre, apagones eléctricos y dañar satélites

# Campo Magnético Global y el Ciclo Solar



(a)

© 2014 Pearson Education, Inc.

(b)

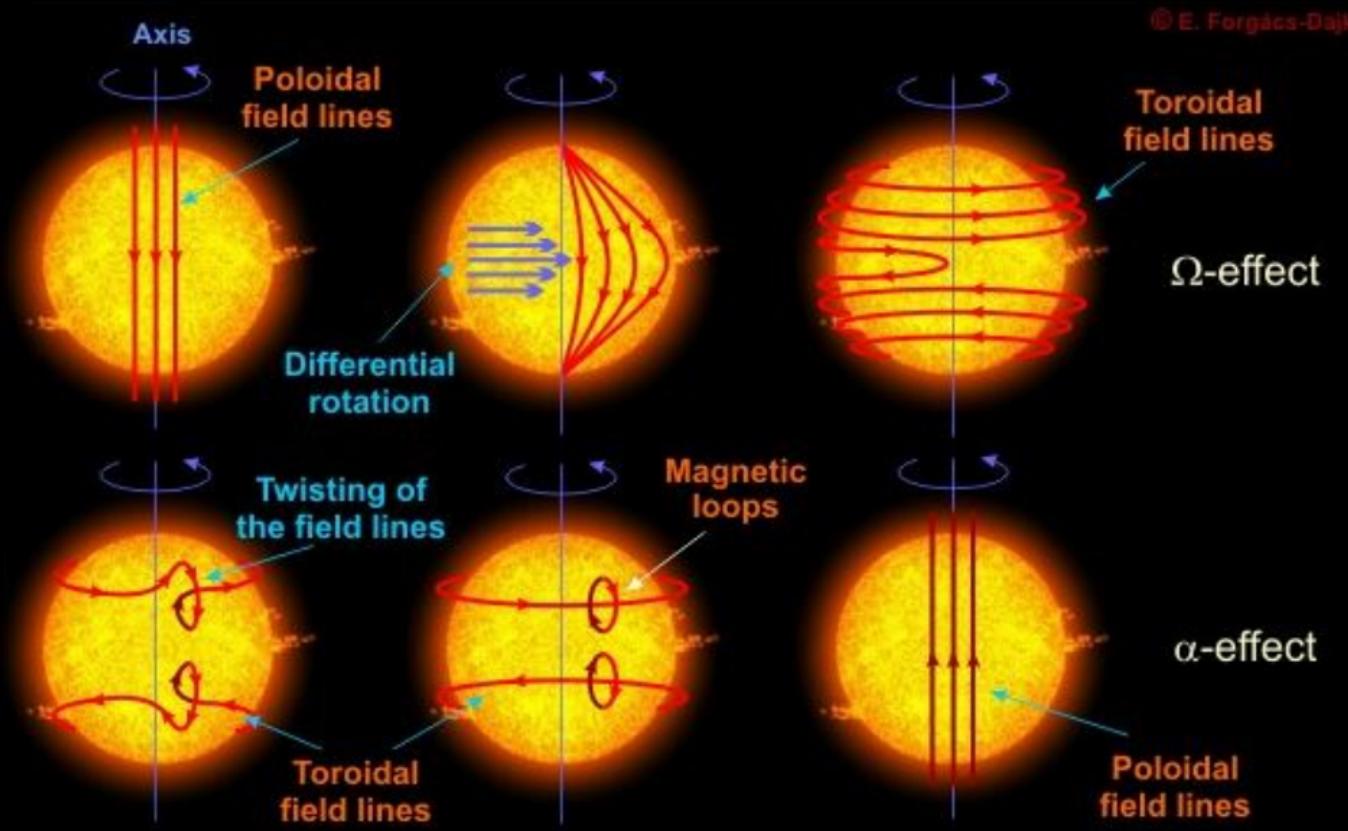
(c)

- 

## Campos Magnéticos

- Plasma muy caliente se mueve en el interior del sol generando intensos campos magnéticos.
- Los campos magnéticos pueden generar manchas solares en la superficie, fulguraciones solares y eyecciones de masa coronal

# Campo Magnético Global y el Ciclo Solar



## 6. Observación Solar

## 6. Observación Solar

### 6.1. ¿Por qué observar el Sol?

# ¿Por qué observar el Sol?

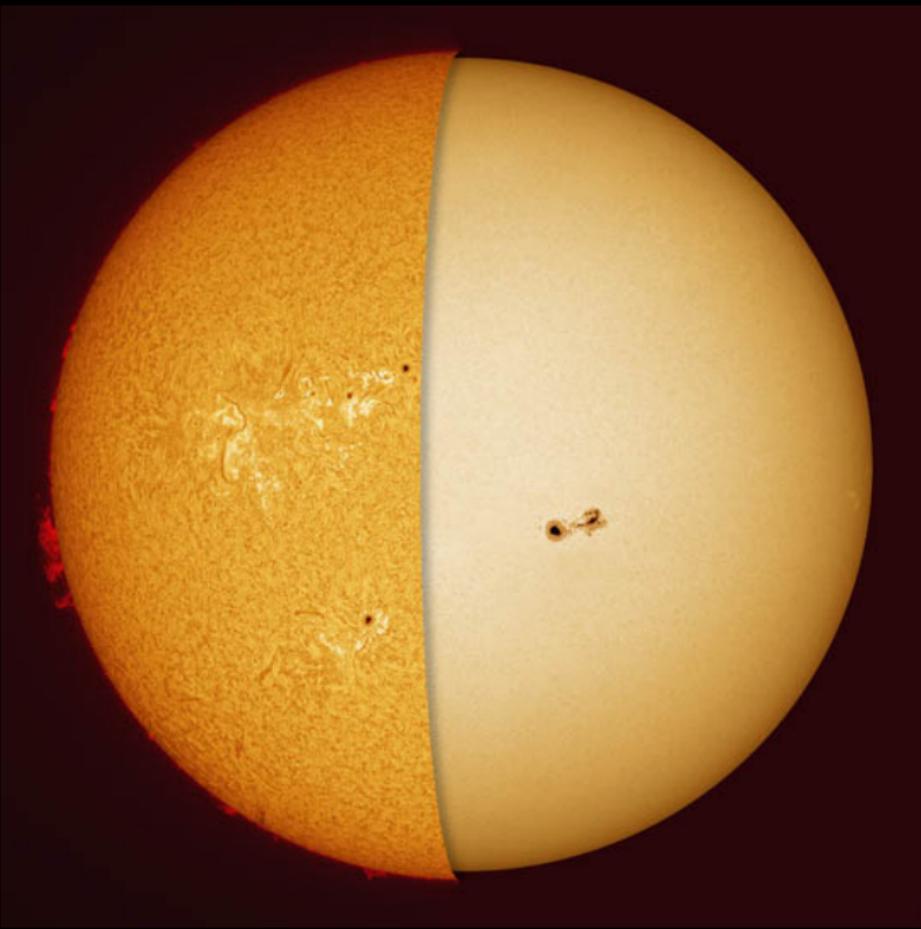
## Ventajas de la observación solar

- Obvio: Se observa de día!
- No es afectada por la contaminación lumínica
- En el verano los cielos suelen estar despejados y los días son más largos
- A diferencia de la observación nocturna, la observación solar es muy dinámica,
  - Se pueden observar cambios en pocos minutos (sobre todo en la observación solar en Hidrógeno-alfa: fulguraciones, cambios en prominencias, etc.).
- Ideal para la divulgación científica al público general y especial niños y adolescentes

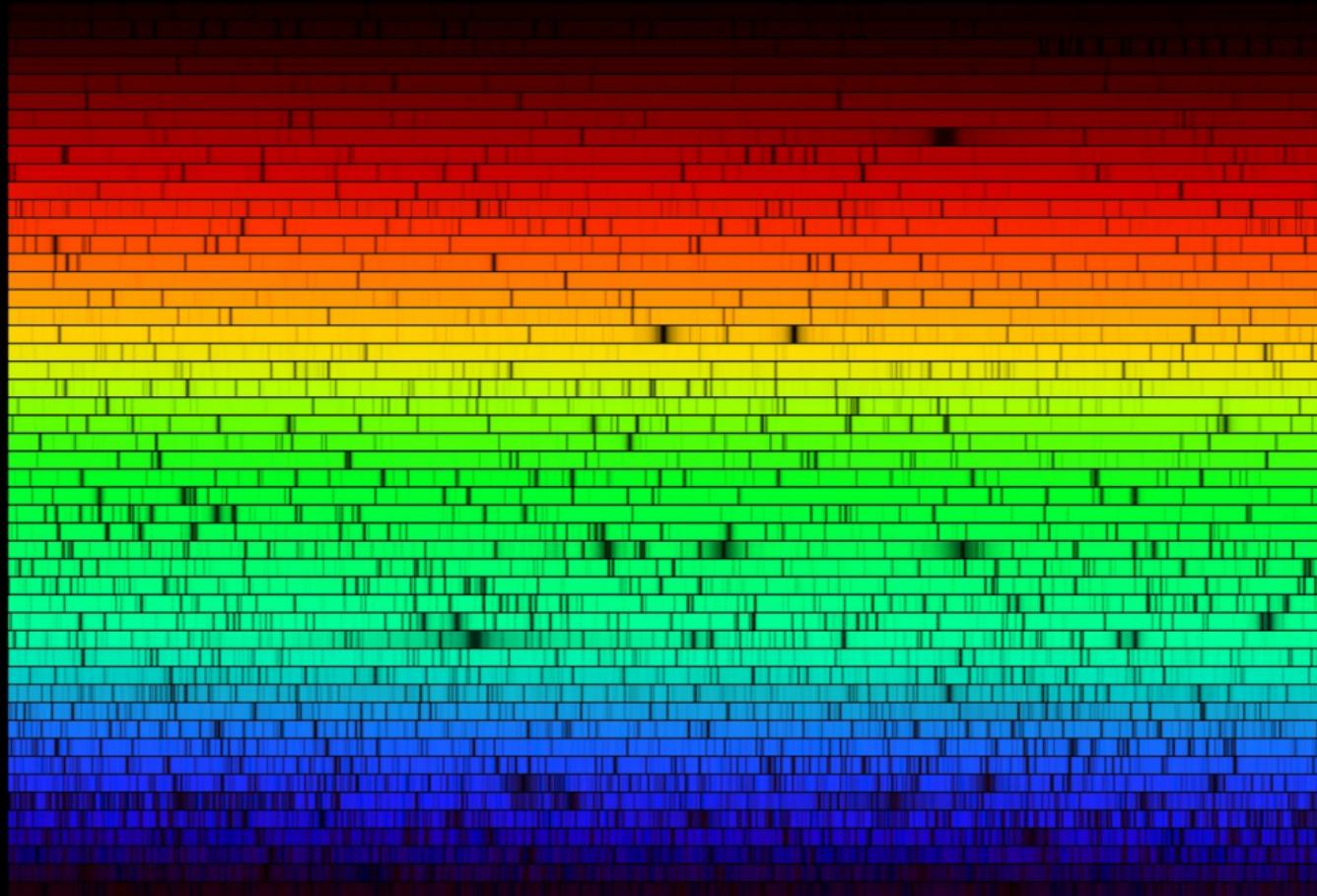
## 6. Observación Solar

6.2. ¿Qué se puede observar en el Sol?

# El Sol en Luz Blanca (fotósfera) vs. Hidrógeno-alfa (cromósfera)



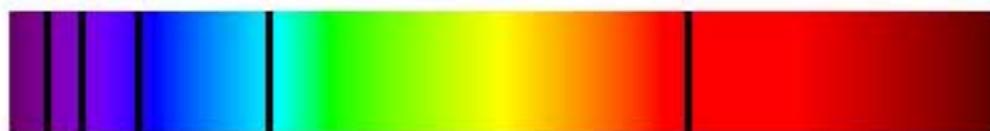
# Espectro de la Luz Visible producida por el Sol



# Espectro de la Luz Visible producida por el Sol

Hidrógeno-alfa

Hydrogen Absorption Spectrum



Hydrogen Emission Spectrum



400nm

700nm

H Alpha Line  
656nm  
Transition N=3 to N=2

## 6. Observación Solar

### 6.2. ¿Qué se puede observar en el Sol?

Observando la Fotósfera Solar con Luz Blanca

# Principales Características del Sol en Luz Blanca

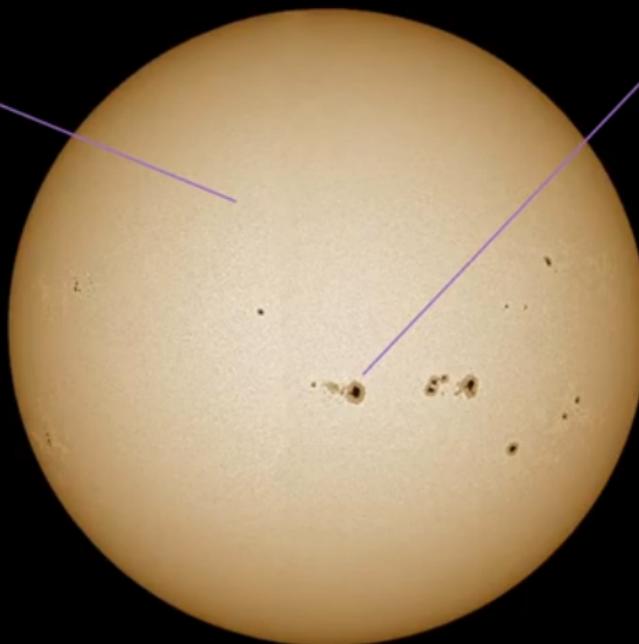
## White Light Filters: What are we seeing?

### Granules

Solar surface  
boiling from the heat

Caused from  
convection currents  
of plasma

Typical granules are  
roughly 900 miles in  
diameter



### Sunspots

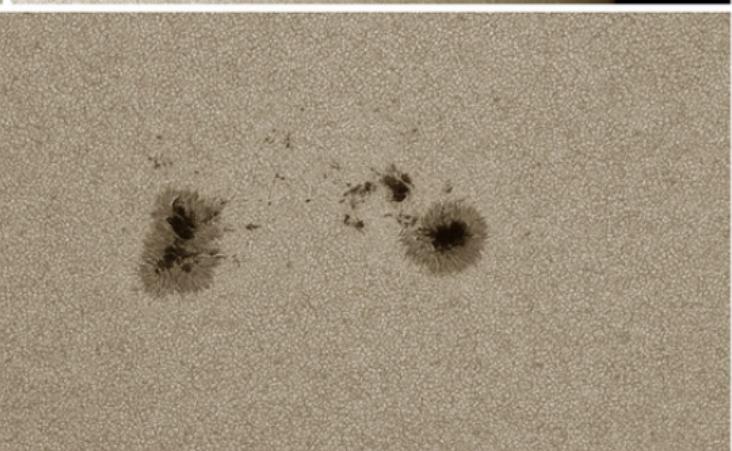
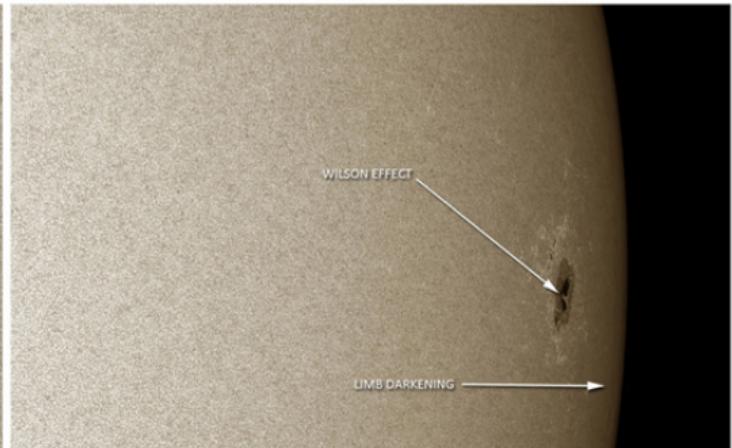
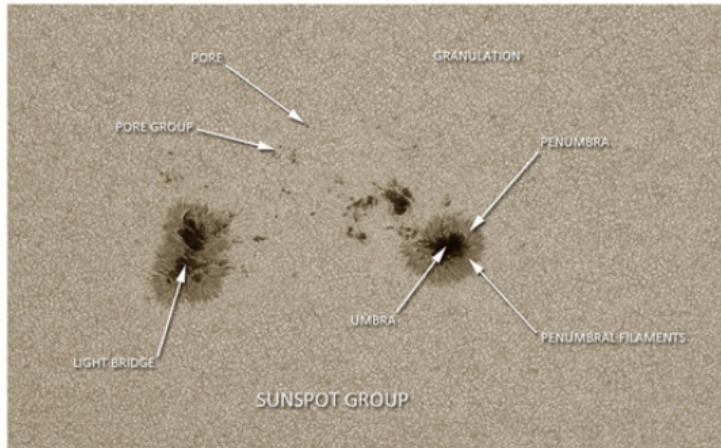
Cooler regions of the sun  
• 6500° F

Formed by large magnetic fields

These fields keep the heat below them from pushing through

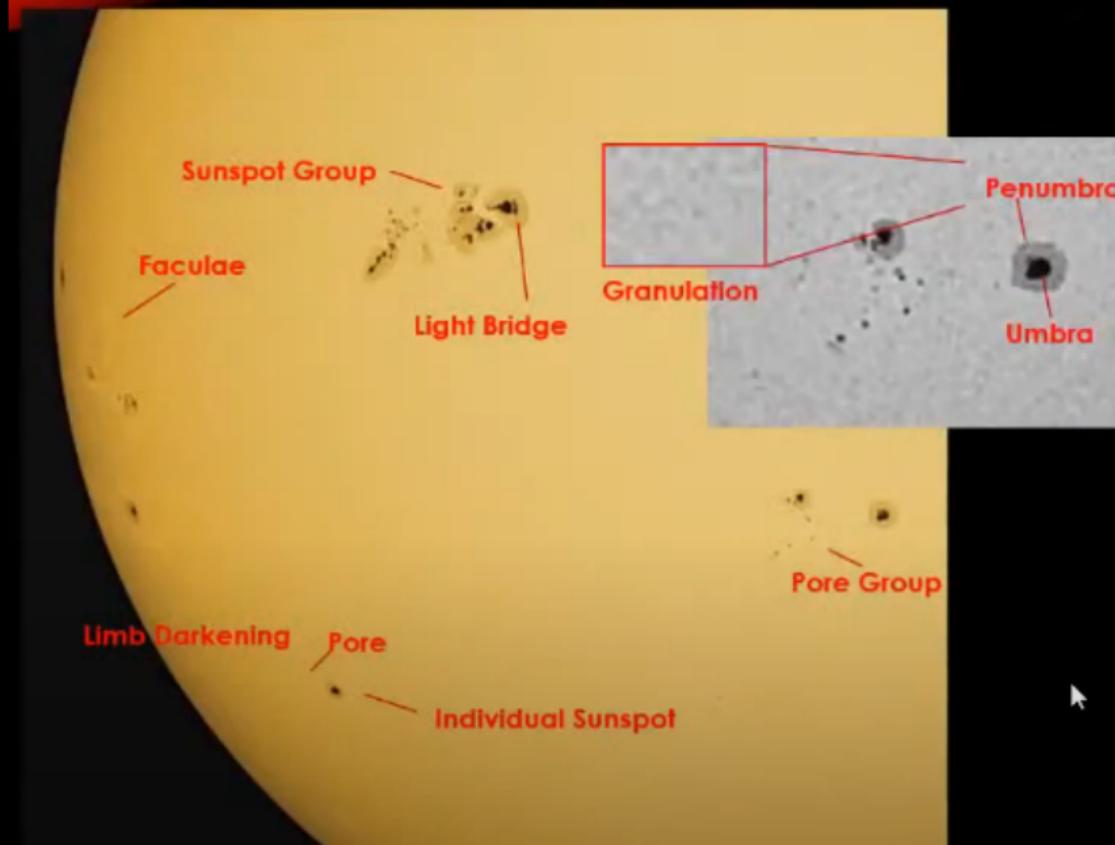
Generally several times larger than Earth

# Principales Características del Sol en Luz Blanca



# Principales Características del Sol en Luz Blanca

## FEATURES IN WHITE LIGHT



## 6. Observación Solar

### 6.2. ¿Qué se puede observar en el Sol?

Observando la Cromósfera Solar en la banda de Hidrógeno-alfa

# Principales Características del Sol en Hidrógeno-alfa

## H-alpha Filters: What are we seeing?



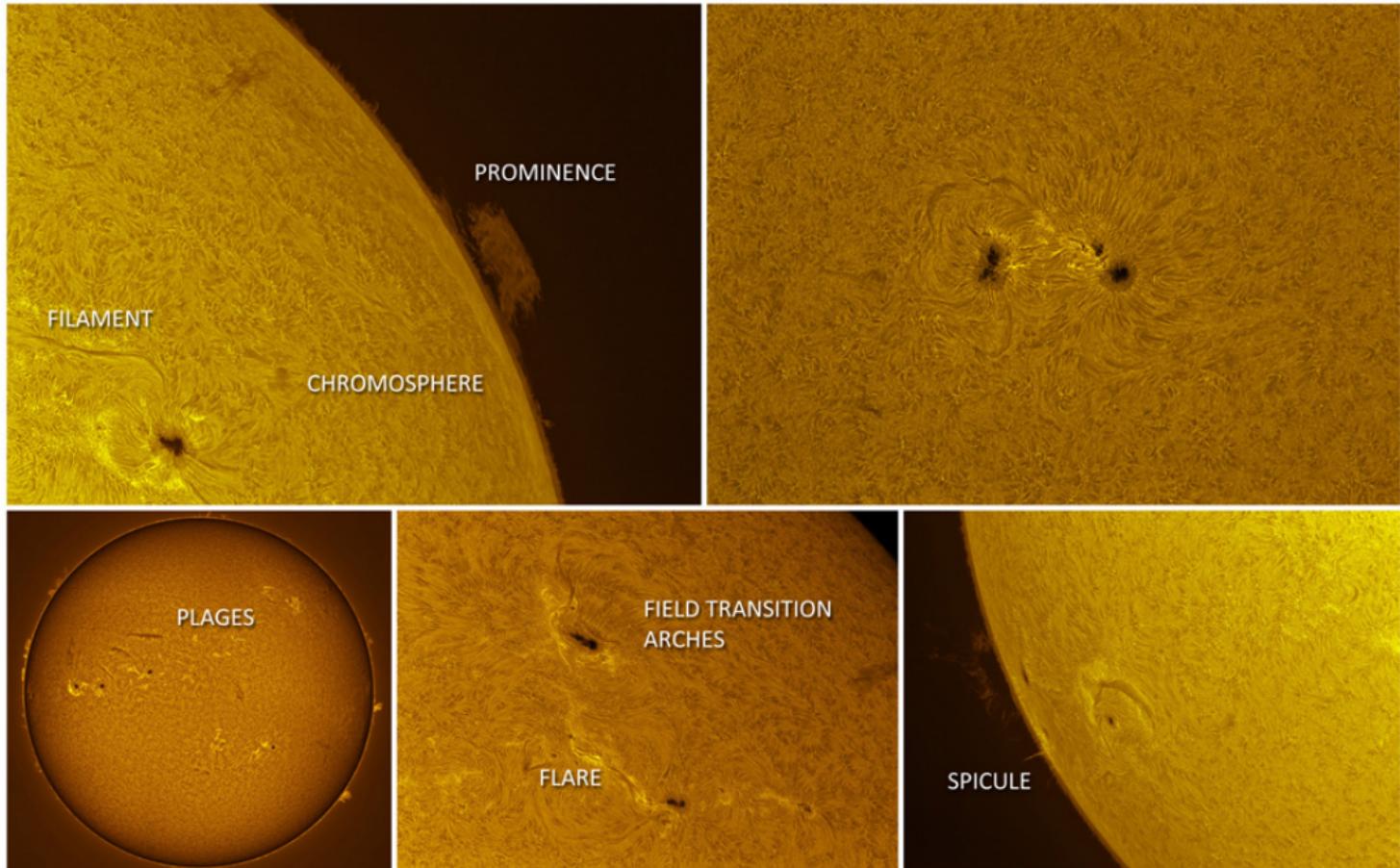
### Active Regions

Where magnetic fields  
are disturbed

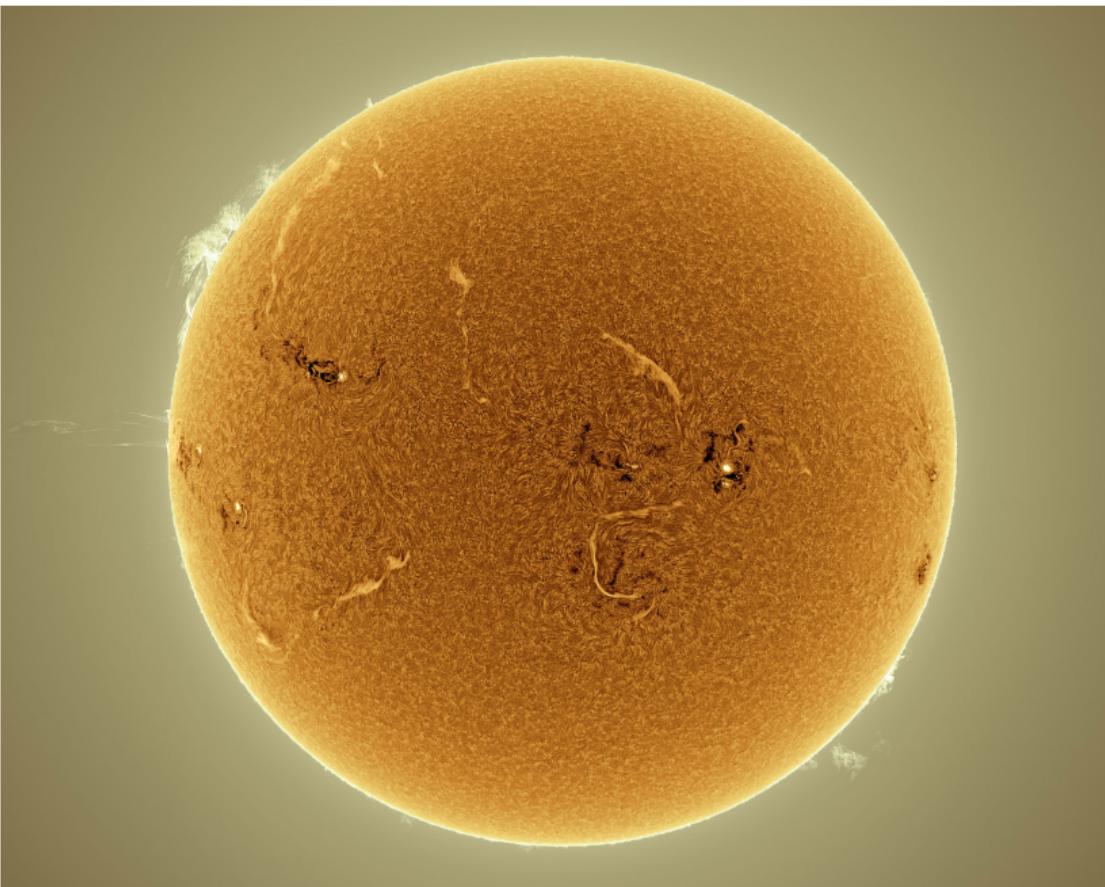
Usually the root of  
solar storms

Associated with  
sunspots

# Principales Características del Sol en Hidrógeno-alfa

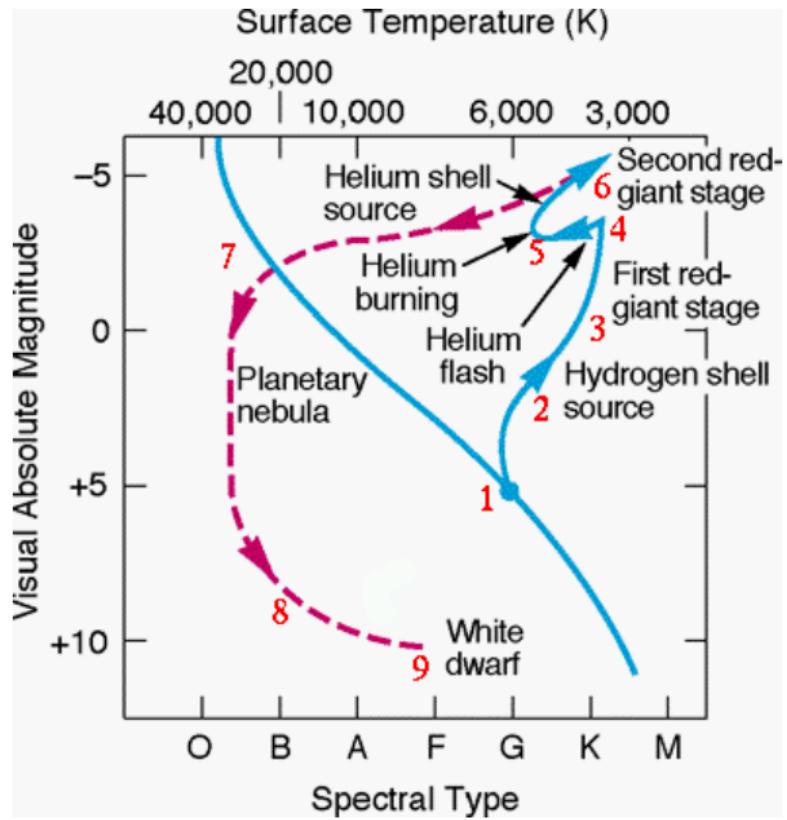


# Principales Características del Sol en Hidrógeno-alfa

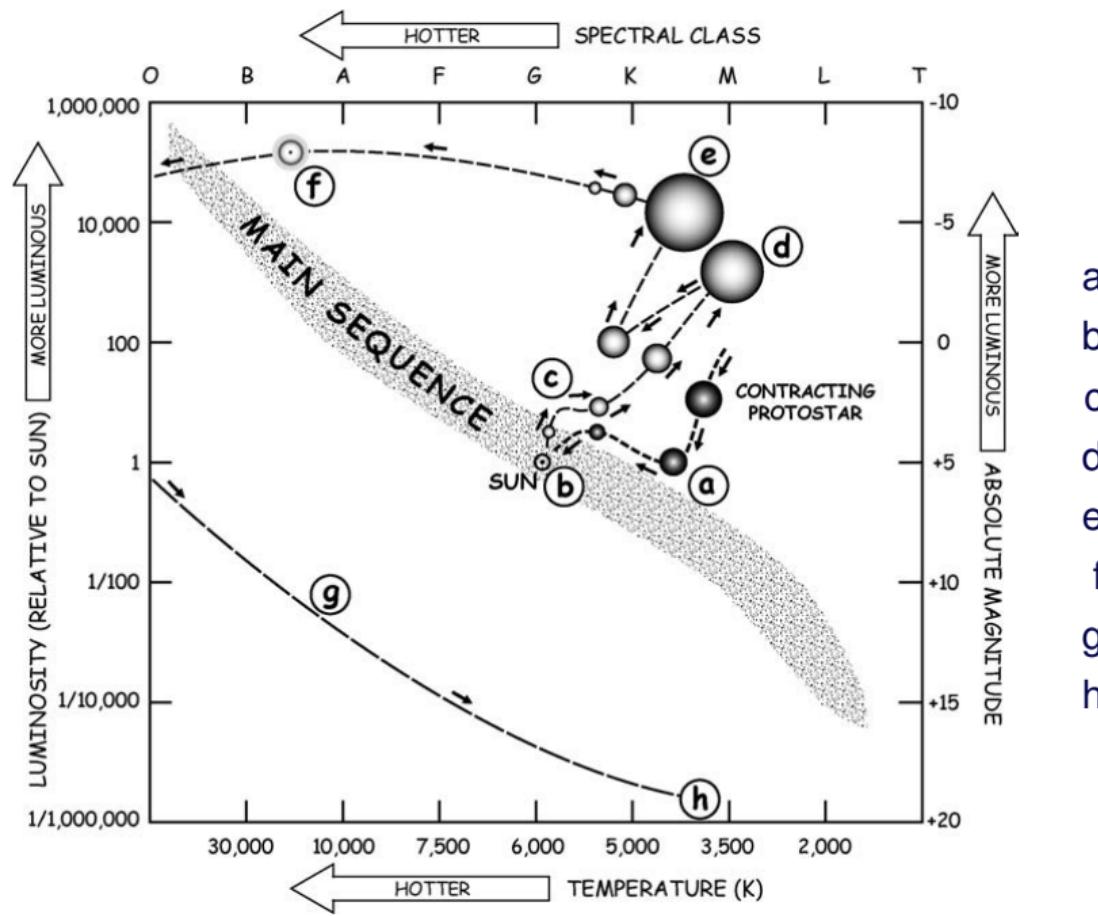


## 7. Material Extra

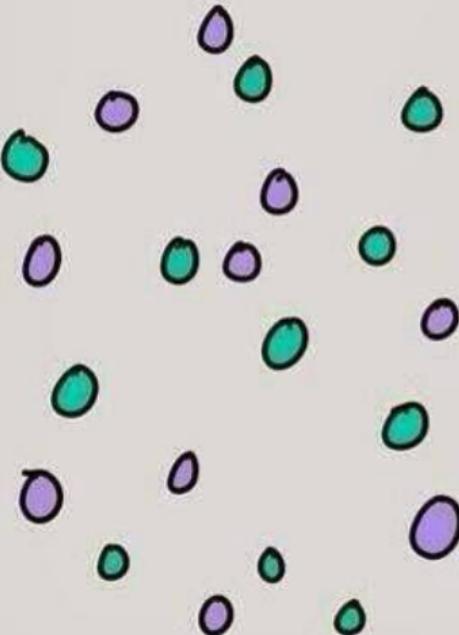
# Evolución Solar



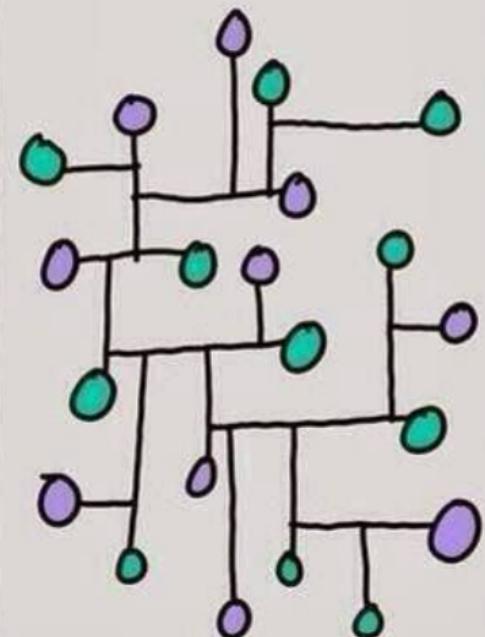
# Evolución Solar



*Informação*



*Conhecimento*



@gapingvoid