



17 - El Sol

Hechos basicos del Sol

Distancia: 1.48×10^8 km
= 1 A.U.

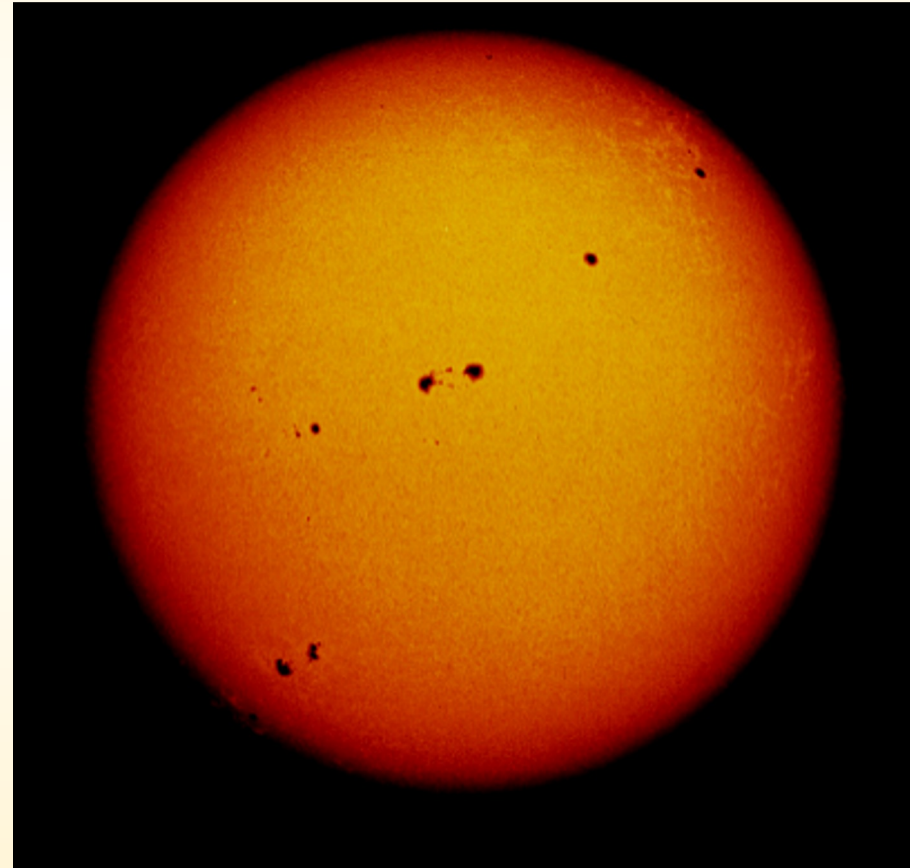
Masa: 1.99×10^{30} kg

Radio: 6.96×10^5 km

Densidad: 1.41 g/cm^3

Luminosidad:

3.8×10^{26} W



Fuente de energía del Sol

Las primeras teorías científicas implicaron reacciones químicas o colapso gravitacional.

- reacciones químicas fueron eliminadas - no pueden explicar la luminosidad del Sol
- la conversión de la energía gravitacional en calor como el encogimiento del Sol garantiza solamente que el Sol brilla por 25 millones de años
- investigaciones geológicas del siglo XIX indican que la Tierra es más vieja

El desarrollo de la física nuclear lleva a la respuesta correcta

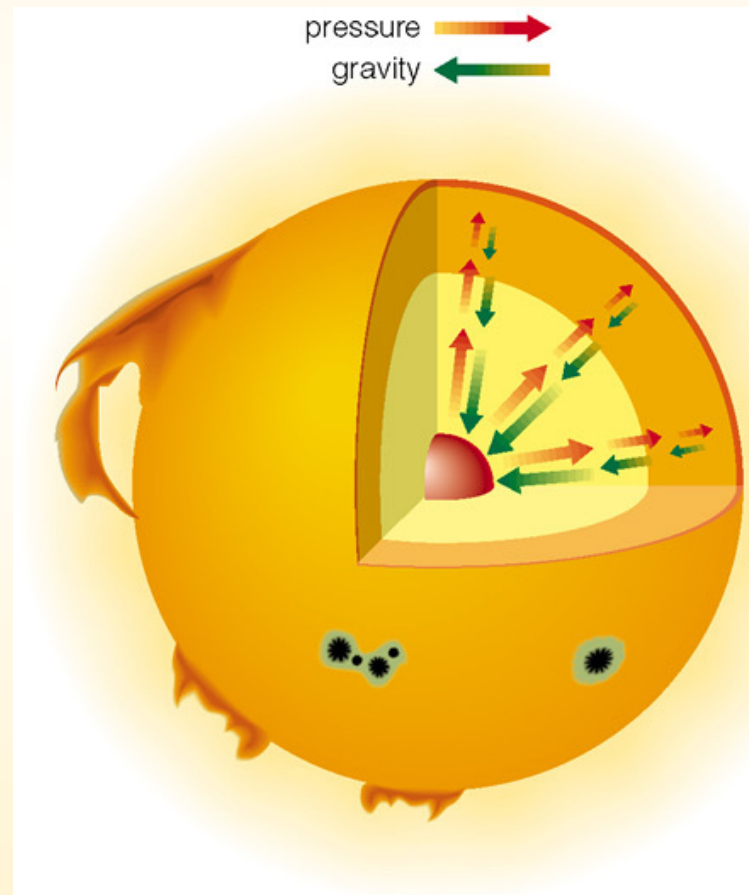
- el Sol genera energía vía reacciones de fusión nuclear
- hidrógeno se convierte en helio en el núcleo del Sol
- la masa perdida en esta conversión se transforma en energía
- la cantidad de energía es dada por la ecuación de Einstein: $E = mc^2$
- dado la masa del Sol, tiene bastante energía para brillar por 10 mil millones años

Ganando un equilibrio

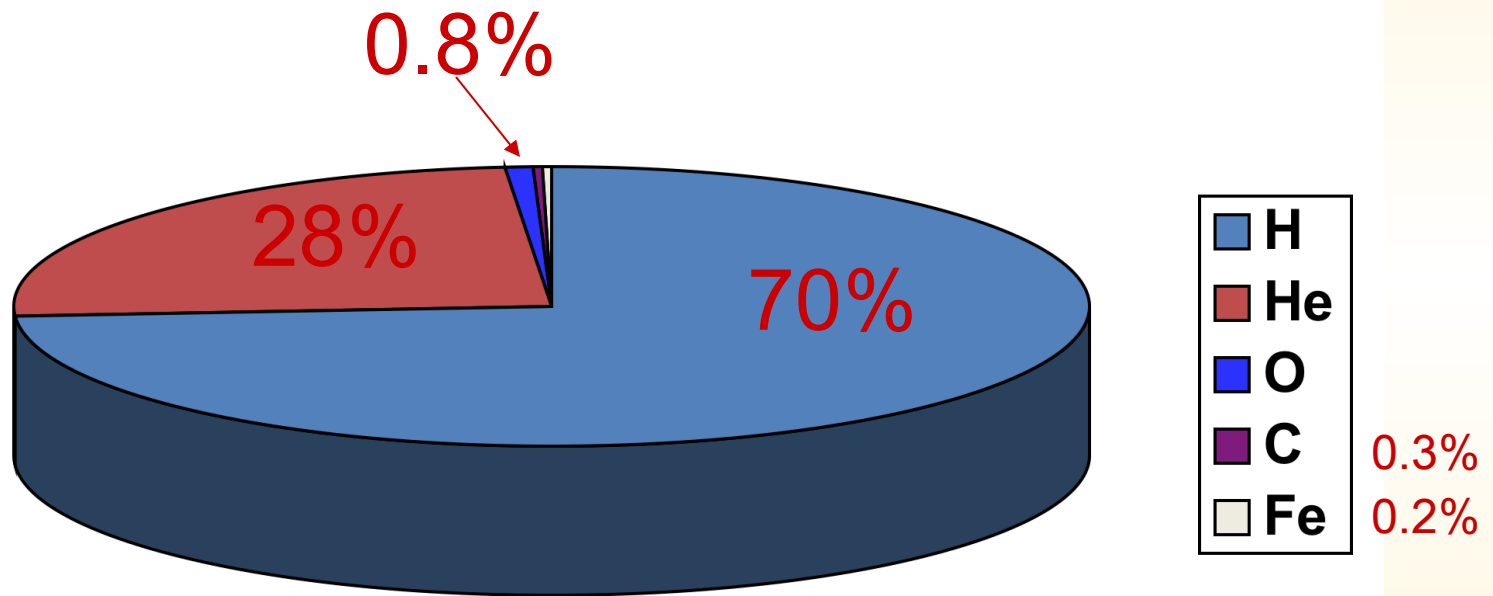
- El Sol comenzó como una nube de gas que experimentaba un colapso gravitacional.
- El mismo proceso de calefacción que fue propuesto alguna vez para explicar la fuerza del Sol, hizo que el núcleo del Sol se calentara y se volviera bastante denso para comenzar reacciones de fusión nuclear.
- Una vez comenzadas, las reacciones de fusión generaron la energía que produce una presión hacia fuera.

Esta presión balancea perfectamente la fuerza interna de la gravedad. Dentro del Sol, la presión es más fuerte donde la gravedad está más fuerte. En la superficie, la presión es menor donde la gravedad es menor.

Este equilibrio se llama **equilibrio gravitacional**. Hace que el radio del Sol siga siendo estable.



Composición del Sol



Sabemos esto identificando las líneas de absorción en el espectro del Sol.

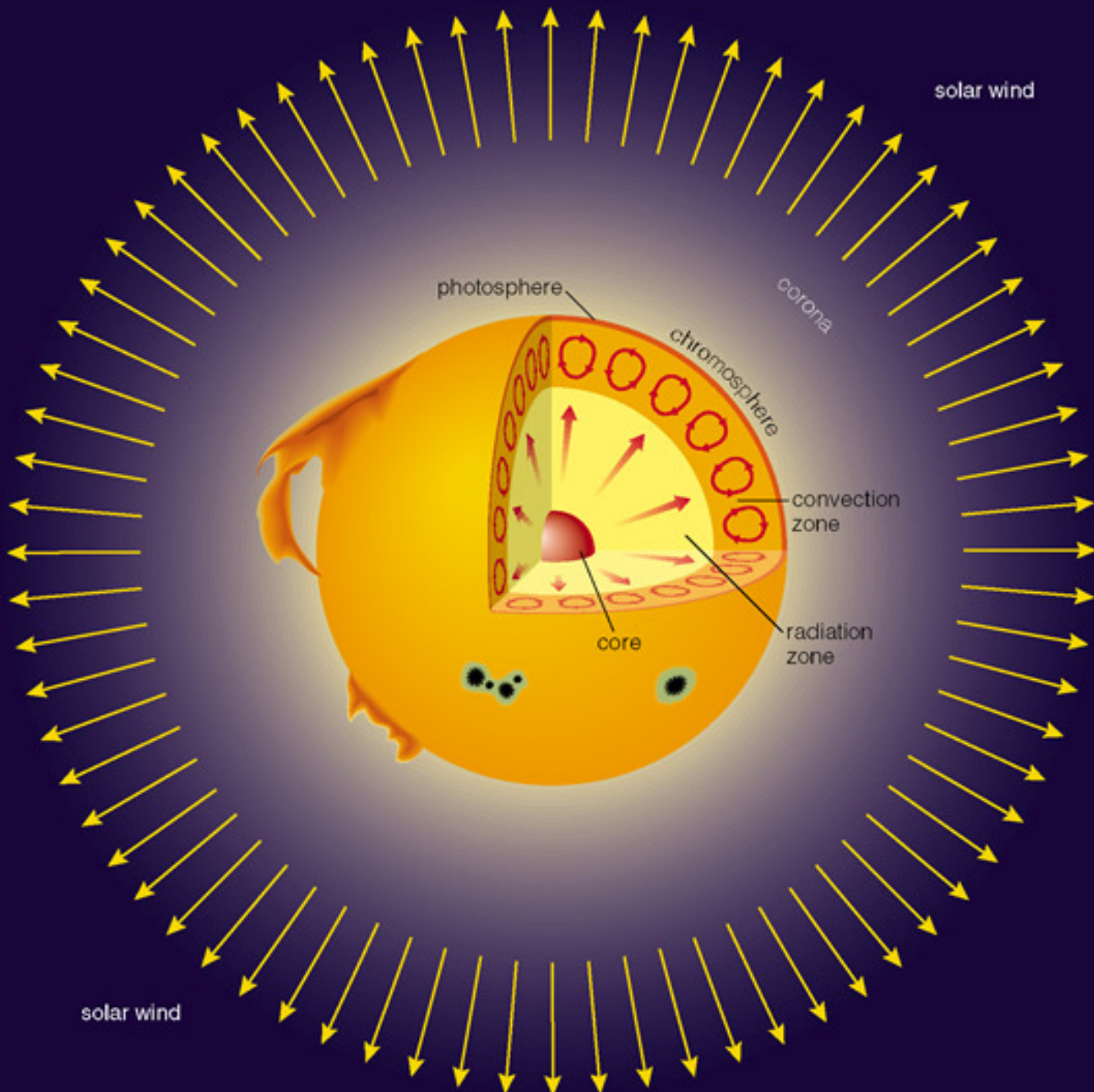


Estas líneas se forman en la fotosfera. Recuerden, si analizamos la luz de las estrellas, podemos encontrar:

- Temperatura de una estrella
- Composición química de una estrella
- Velocidad radial de una estrella (Doppler)

Capas del Sol

Nombre	Temperatura	Profundidad
Nucleo	$1.5 \times 10^7 \text{ K}$	$0.25 R_{\odot}$
Zona radiativa	$> 2 \times 10^6 \text{ K}$	$0.70 R_{\odot}$
Zona convectiva	$< 2 \times 10^6 \text{ K}$	$0.85 R_{\odot}$
Fotosfera	$5.8 \times 10^3 \text{ K}$	400 km espesor
Cromosfera	$1-5 \times 10^4 \text{ K}$	2,500 km espesor
Corona	$2 \times 10^6 \text{ K}$	600,000 km espesor
Viento solar	$> 10^6 \text{ K}$	más allá de la órbita de Plutón



Capas del Sol

El Núcleo

- $T = 1.5 \times 10^7$ K; profundidad = $0 - 0.25 R_{\odot}$
- Aquí es donde la energía del Sol se genera.

Zonas Internas

- $T < 8 \times 10^6$ K; profundidad = $0.25 - 0.86 R_{\odot}$
- La energía es transportada por el interior.
- El interior se divide entre dos zonas:
 - Zona radiativa
 - Zona convectiva
- Límites entre ambos:
 - $T = 2 \times 10^6$ K; profundidad = $0.70 R_{\odot}$

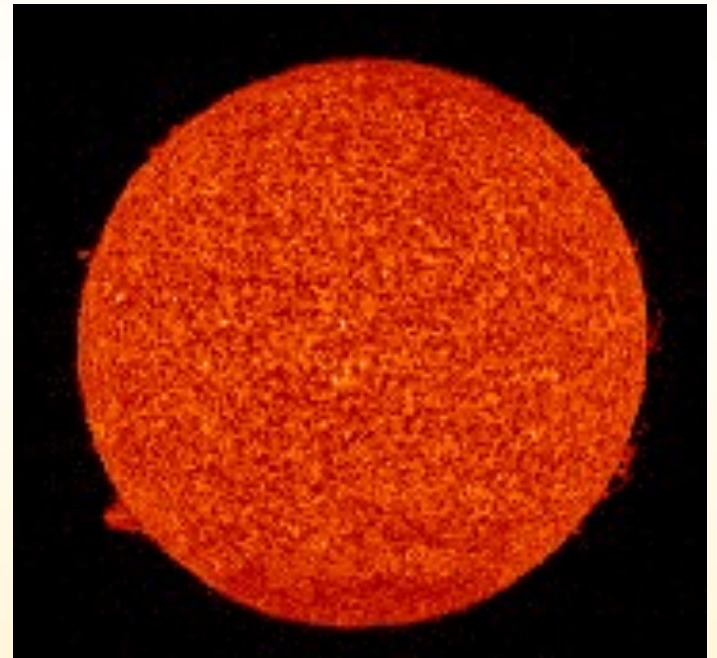
Fotosfera

- $T = 5,800 \text{ K}$; profundidad = 400 km
- Esta es la superficie amarilla que vemos



Cromosfera

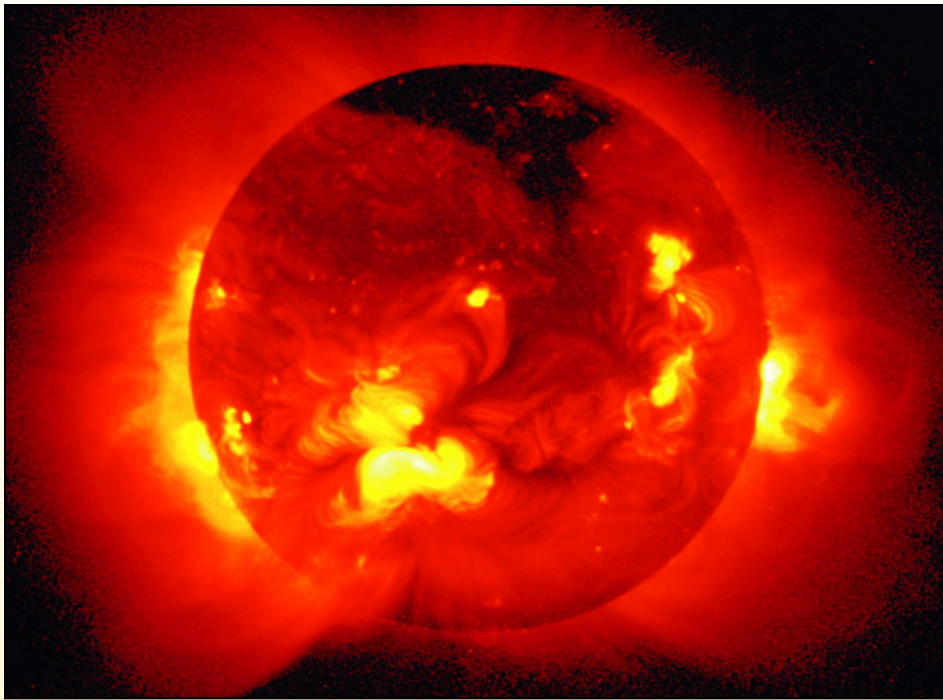
- $T = 1 - 5 \times 10^4$ K; extensión = 2,500 km
- Una fina capa encima de la fotosfera donde la mayor parte de la luz solar ultravioleta es emitida.
- Foto en UV del Sol
- luz emitida por helio neutro en 20.000 K



courtesy of SOHO/SUMER
consortium SOHO is a project of ESA
and NASA

Corona

- $T = 2 \times 10^6$ K; extensión $\sim 600,000$ km
- Es gas caliente, ionizado que rodea el sol.
 - que emite rayos-X en su mayoría
- Se puede observar en luz visible durante un eclipse.



X-ray image (YOHKOH telescope)



Luz Visible

Viento Solar

La corriente de electrones, protones, núcleos de helio y otros iones que fluyen desde el sol.

Se extiende más allá de Plutón.

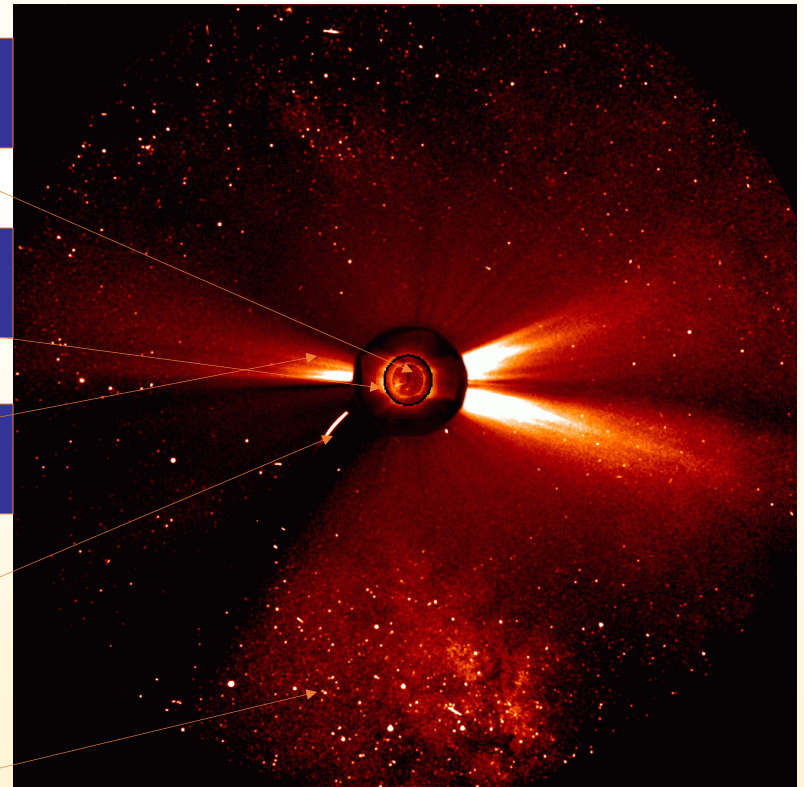
X-rayes imagen de corona

UV imagen de viento solar

imagen visible de viento solar

cometa SOHO-6
(cayó en el Sol)

Sagittarius



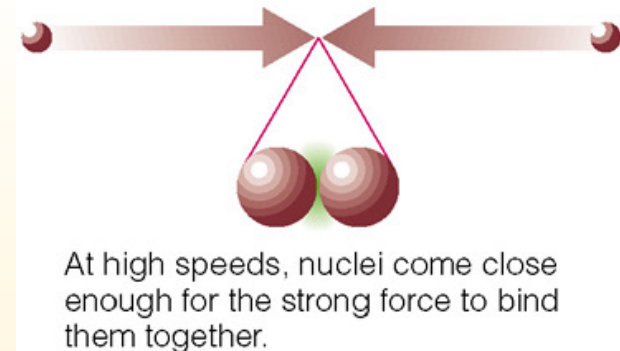
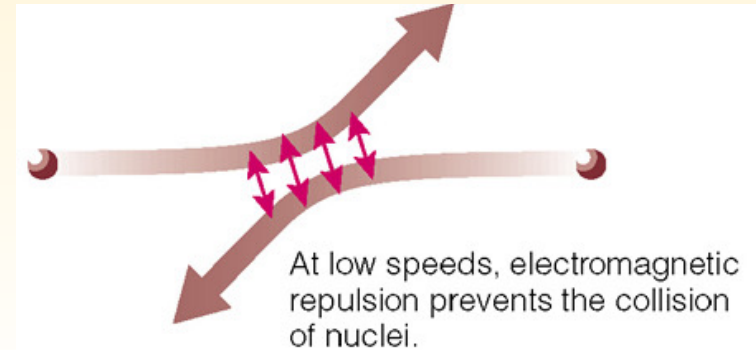
courtesy of SOHO consortium SOHO
is a project of ESA & NASA

Fusión Nuclear del Sol

¿Por qué la fusión se produce en el centro del Sol?

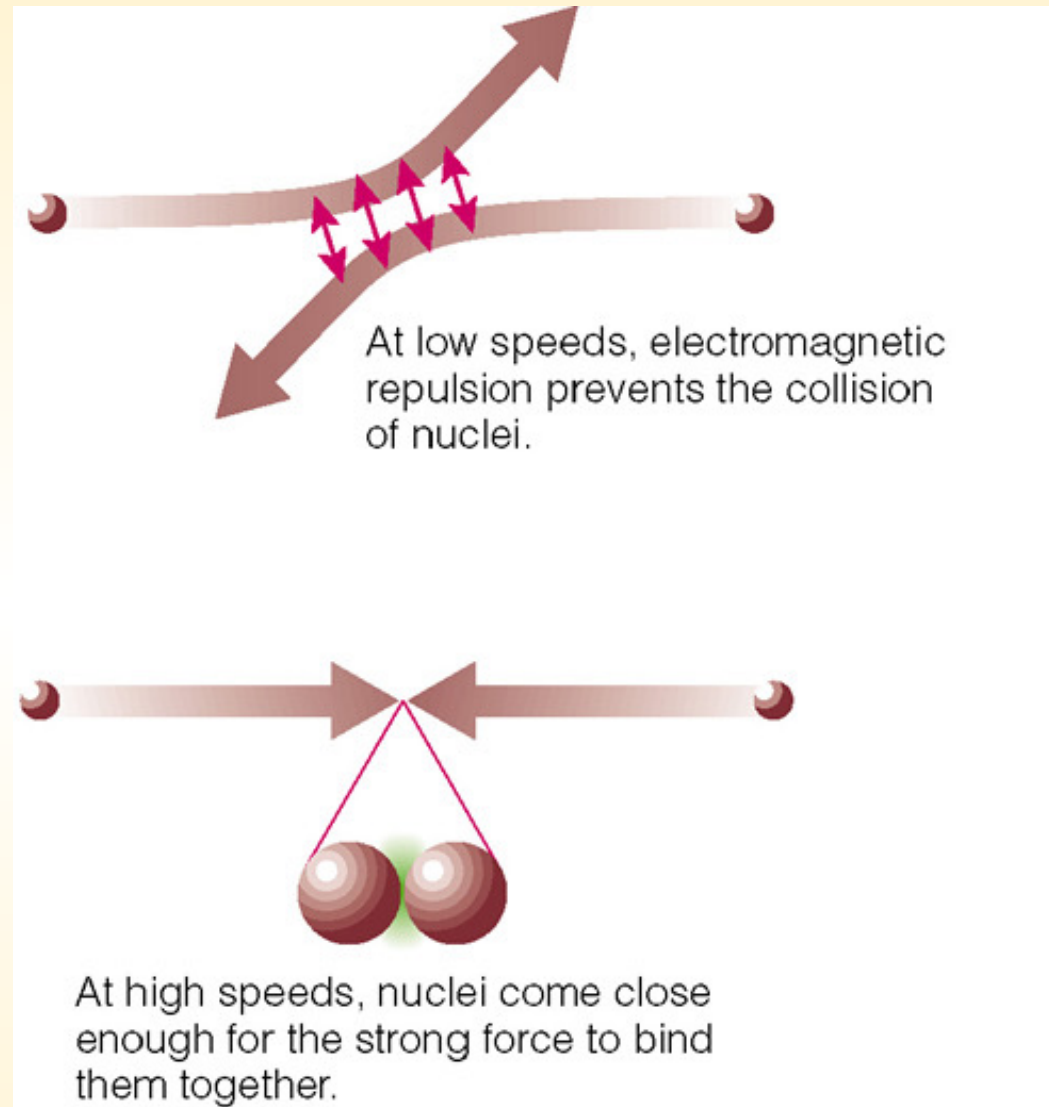
La fusión nuclear:

- una reacción donde los núcleos más pesados se crean mediante la combinación (fusión) de núcleos más ligeros.
- todos los núcleos tienen carga positiva
- La fuerza electromagnética provoca que los núcleos se repelen.

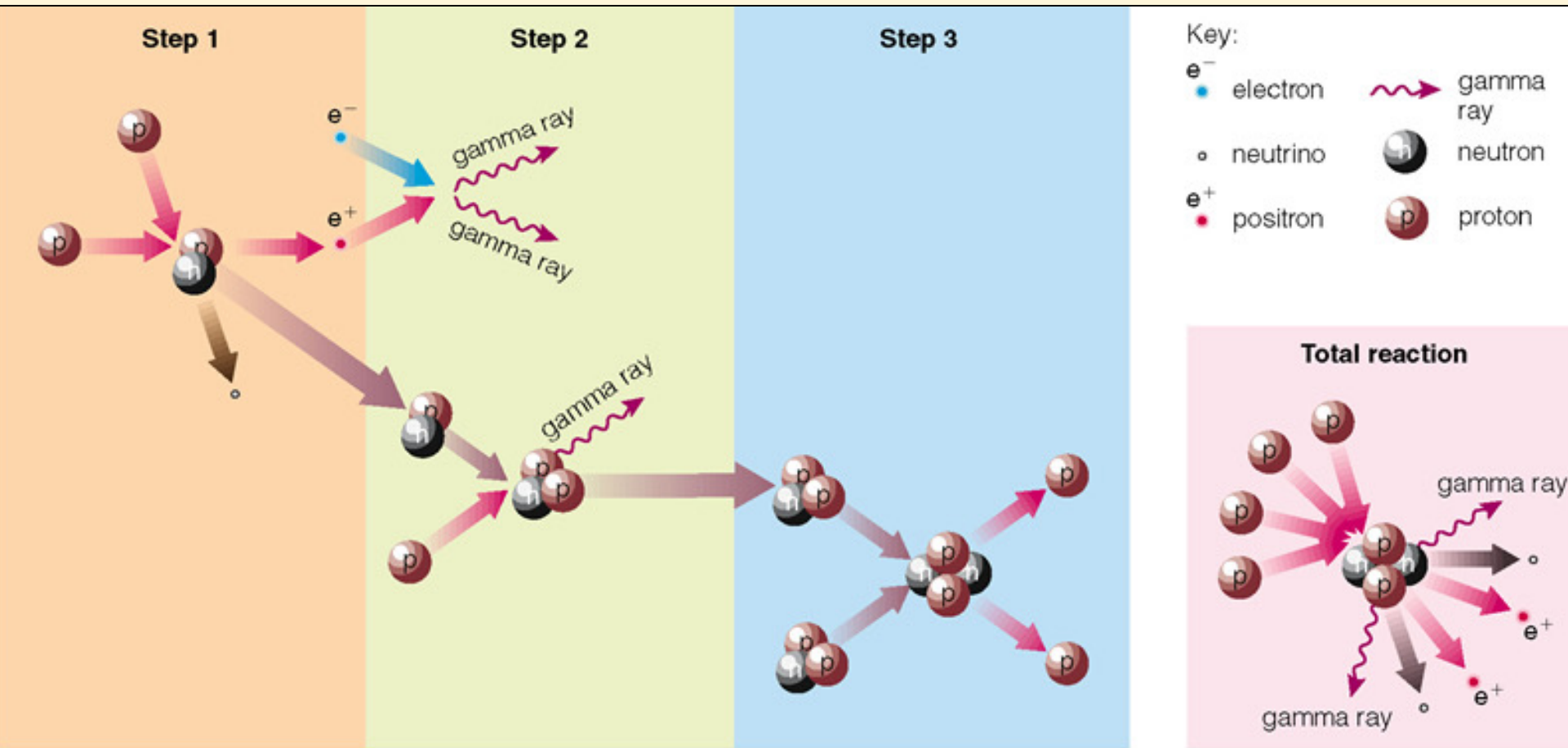


© 2005 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley

- para que ocurra la fusión, los núcleos deben estar en movimiento lo suficientemente rápido para superar la repulsión EM
- esto requiere altas temperaturas y presiones
- Cuando núcleos se tocan, la fuerza nuclear los une

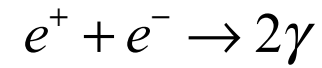
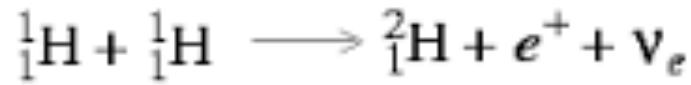


Cadena Proton-Proton



IN: 6 H, (2 e^-)

OUT: He, 2 H, 2 ν_e , 4 γ



69%

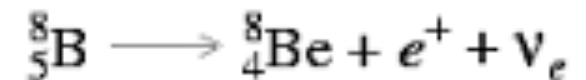
31%



(PP I)

99.7%

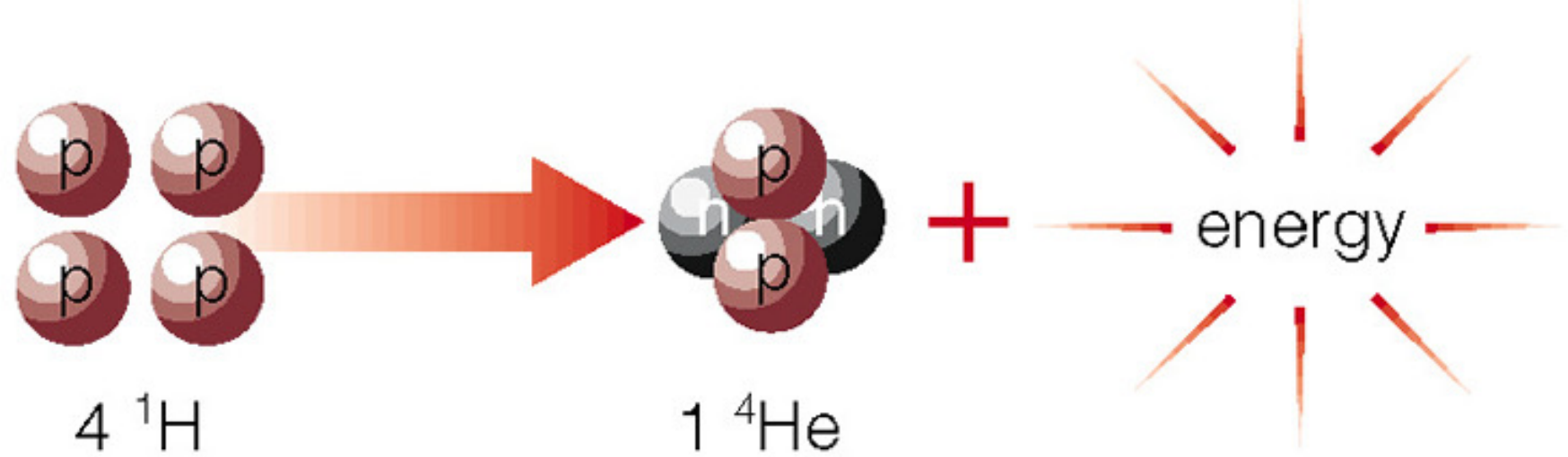
0.3%



(PP II)



(PP III)



© 2005 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley

Efectivamente 4 núcleos de H se convierten en un núcleo de He y se libera energía.

¿Por qué brilla el Sol?

porque....

La masa de 1 núcleo de He es solo 99.3%
de 4 veces la masa de H

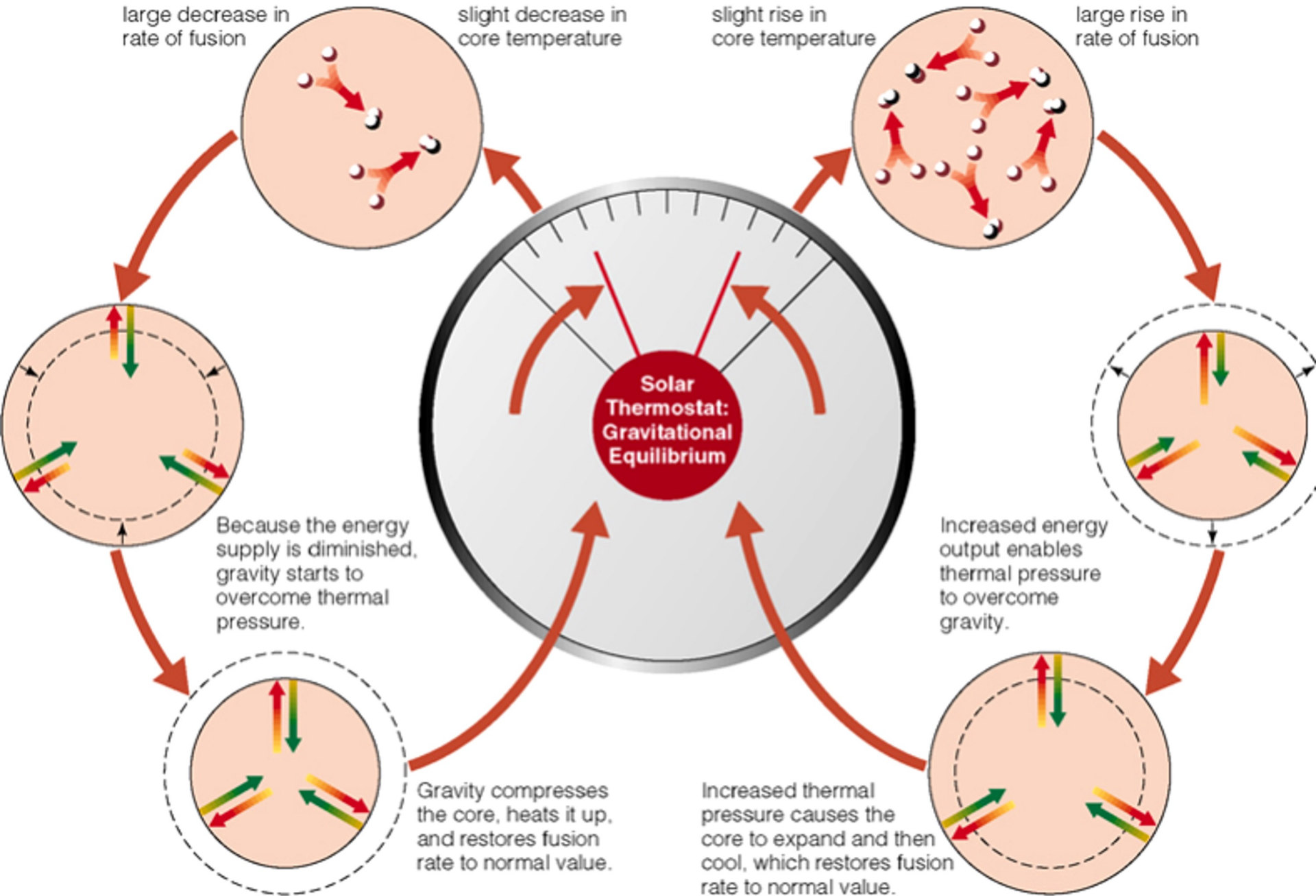
¿Dónde se fue el 0.7 % de la masa?

... Energía!!!

$$E = mc^2$$

El Termostato Solar

- La tasa de reacciones de fusión depende de la temperatura.
- Cuanto mayor sea la T , más rápida es la tasa, más energía se produce.
- Este hecho, junto con el equilibrio gravitacional, actúa como un mecanismo que regula la producción de la energía solar.
- Su producción de energía (luminosidad) se mantiene estable



La Luminosidad del Sol

La luminosidad del Sol

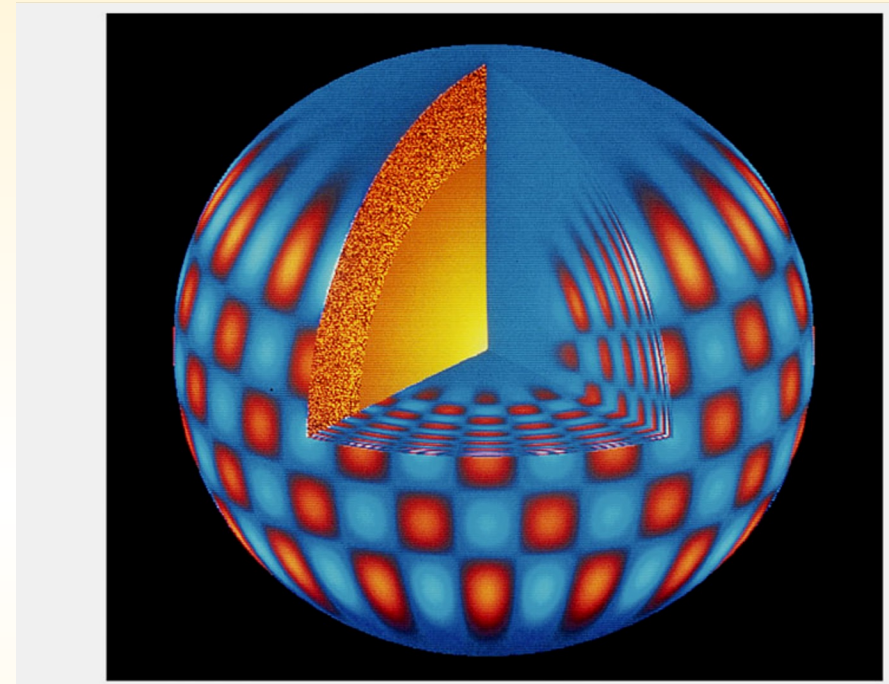
- La luminosidad del Sol se mantiene estable en el plazo corto.
- Sin embargo, a medida que más hidrógeno se fusione en helio (cuatro núcleos de H se convierten en un núcleo de He) el número de partículas en el núcleo del Sol disminuye con el tiempo
- El núcleo del Sol se contraerá, causando que se caliente

- La tasa de fusión aumentará para balancear la mayor gravedad
- Un nuevo equilibrio se alcanza y tenemos estabilidad con una mayor producción de energía
- El Sol aumenta su luminosidad con tiempo a largo plazo
- Los modelos indican que la luminosidad del Sol ha aumentado un 30% desde que se formó hace 4,6 billones de años
- Se ha pasado de $2,9 \times 10^{26}$ vatios a $3,8 \times 10^{26}$ vatios de hoy

"Observar" el interior del Sol

- El interior del Sol es opaco.
- No podemos mirar directamente al interior del Sol con luz
- Podemos construir modelos matemáticos de computador del mismo.
- Los modelos son un sistema de ecuaciones de temperatura, presión y densidad vs. profundidad.
- Estos valores se calculan utilizando las leyes conocidas de la física, comprobando el cumplimiento mediante las cantidades observables del Sol

- Podemos medir directamente las ondas de sonido moviéndose por el interior de Sol
- Observamos "sunquakes" (sol-motos) en la fotosfera mediante el movimiento de Doppler
- las ondas sonoras pueden verificar las condiciones interiores predichas por los modelos



Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

Hay otra manera de ver directamente el núcleo
... neutrinos

El Problema de Neutrinos

- Los neutrinos que llegan a la Tierra, directamente desde el núcleo del Sol, son un producto de la cadena protón-protón.
- Los hemos detectado, lo que demuestra que la teoría de las reacciones de fusión nuclear es correcta!
- Pero sólo detectamos alrededor del 30% - 50% de los neutrinos que son predichos por los modelos teóricos.
- Ya sea que nuestra comprensión de las reacciones de fusión nuclear o el conocimiento de los neutrinos está mal!

- Hasta hoy, hemos descubierto tres tipos de neutrinos:
 - neutrino electrón (ν_e)
 - neutrino muón (ν_μ)
 - neutrino tau (ν_τ)
- Pero nuestros detectores de neutrinos solo pueden registrar neutrinos electron
- Si los neutrinos pueden cambiar de tipo después de haber sido creados, esto podría solucionar el problema "neutrino".

Métodos de Transporte de Energía

Zona de Radiación:

- La energía viaja con fotones de luz, que continuamente chocan con las partículas
- Siempre cambiando la dirección (paseo aleatorio)
- Los fotones pueden cambiar las longitudes de onda

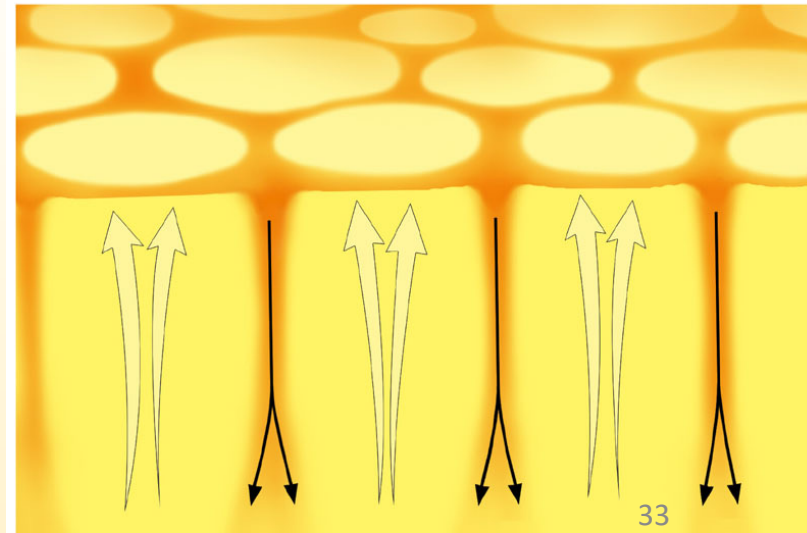
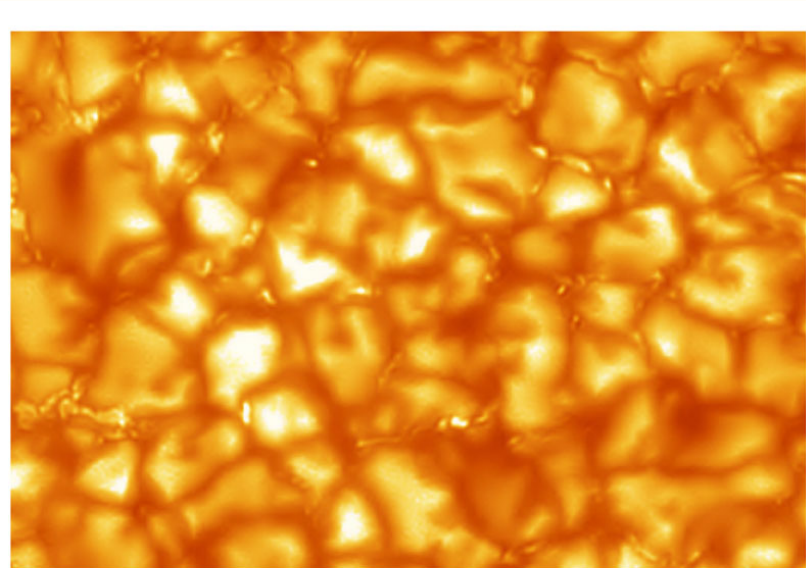


Esto se llama difusión radiativa

Este es un proceso lento!
Se tarda aproximadamente 1 millón de años para la energía para viajar desde el núcleo hasta la superficie.

Zona de Convección:

- fotones que llegan al final inferior de la zona de convección son absorbidos y no dispersados por la materia
- La parte inferior de la zona es gas caliente que sube a la cima
- Gas más frío se hunde hasta el fondo... igual que cuando se hierve una olla de agua!
- La energía es traída a la superficie a través de movimientos a granel de la materia (convección)

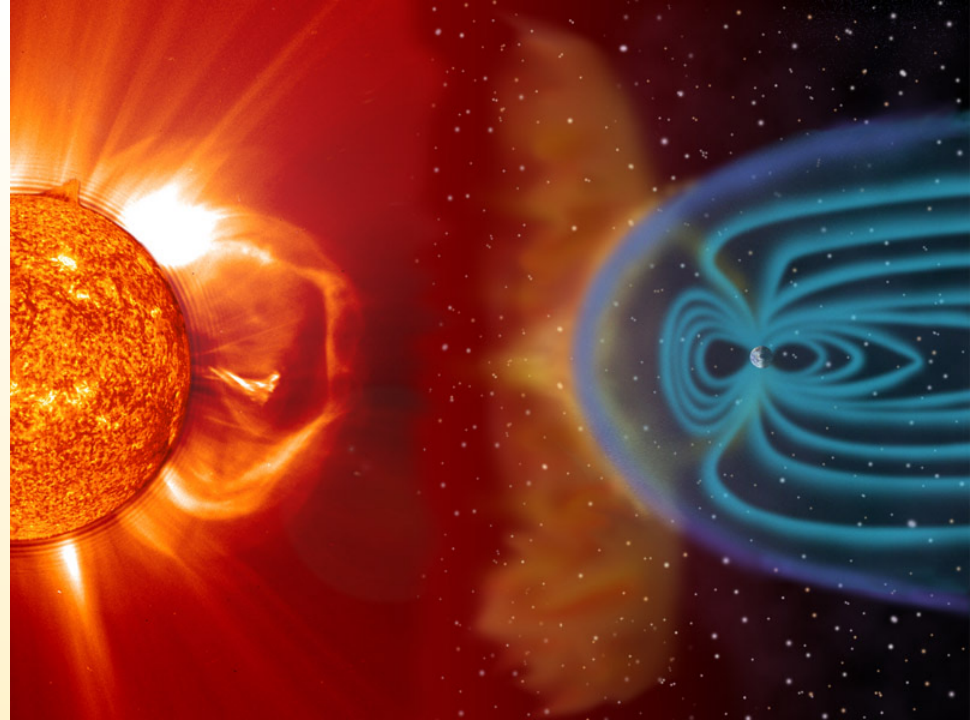


La Corona

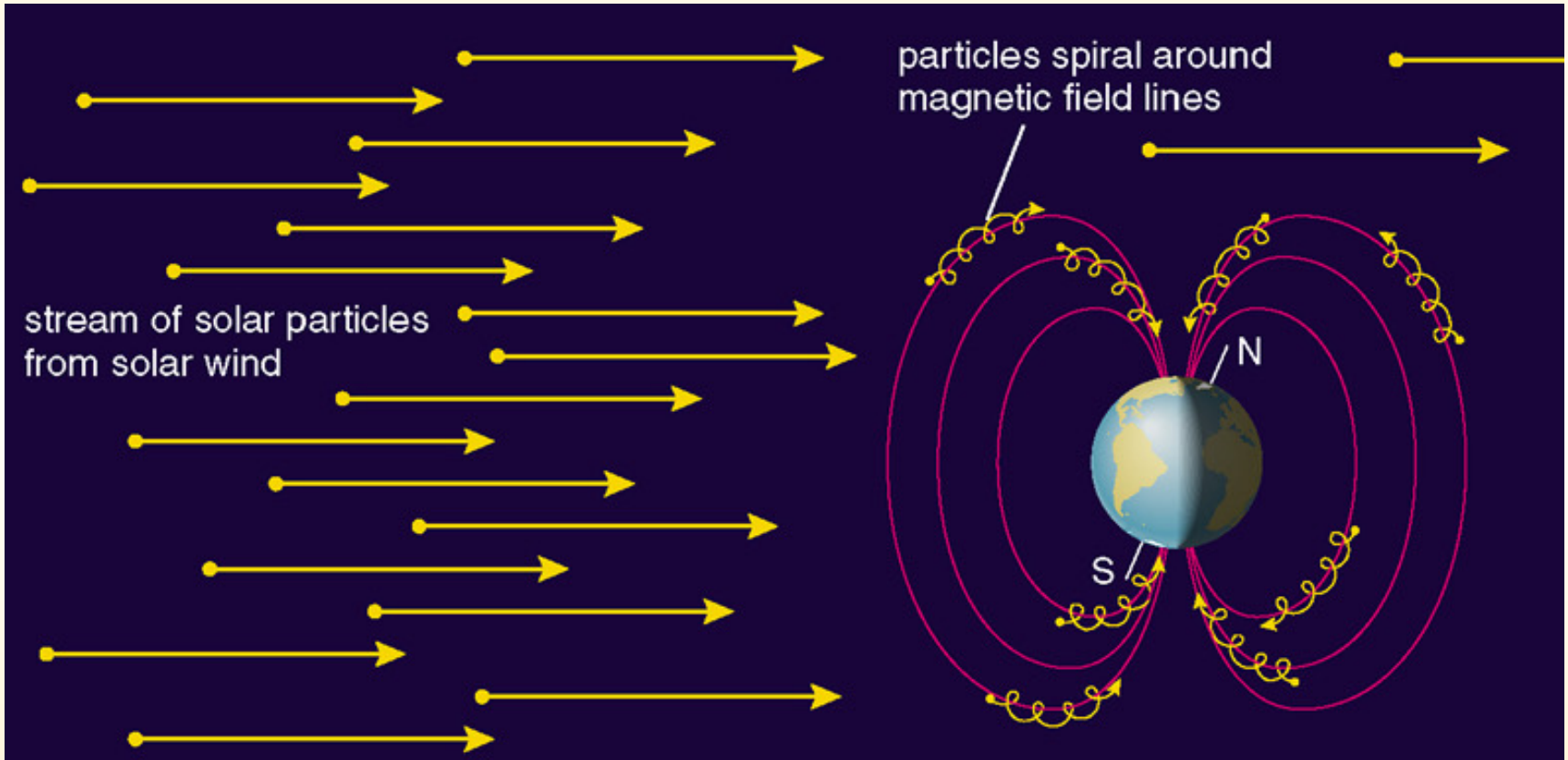
- **bucles magnéticos** que son agitados en sus bases por los movimientos turbulentos en la zona de convección
- el campo magnético torcido y trenzado origina lazos de liberación de energía para calentar el gas a 2 millones de K.
- El gas cargado (iones) se mantiene pegado a los bucles magnéticos.
- La corona no es uniforme, hay parches vacíos llamados agujeros de la corona
- La calefacción magnética explica por qué las temperaturas comienzan a aumentar por encima de la fotosfera.

Viento Solar

- Cuando las líneas de campo magnético se rompen, liberan las partículas cargadas en el espacio.
- Este viento solar escapa a través de los agujeros coronales.



electrones, protones, núcleos de He
expulsados por las borrascas solares (solar flares)



Interactúan con el campo magnético de la Tierra
y causa ...

Las Auroras



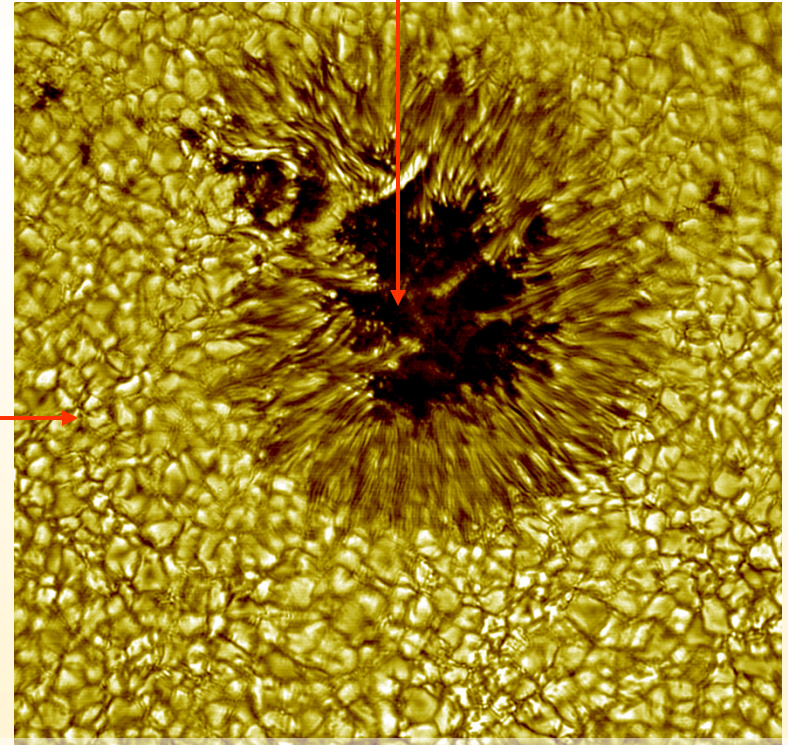
- Un fuerte viento solar puede afectar a la tecnología humana por:
 - interferir con las comunicaciones
 - la anulación de redes eléctricas
 - Causando daños electrónicos de los vehículos espaciales
- Aún no estamos seguros qué efectos tiene la actividad solar sobre el clima de la Tierra.

Manchas Solares

Características fotosféricas

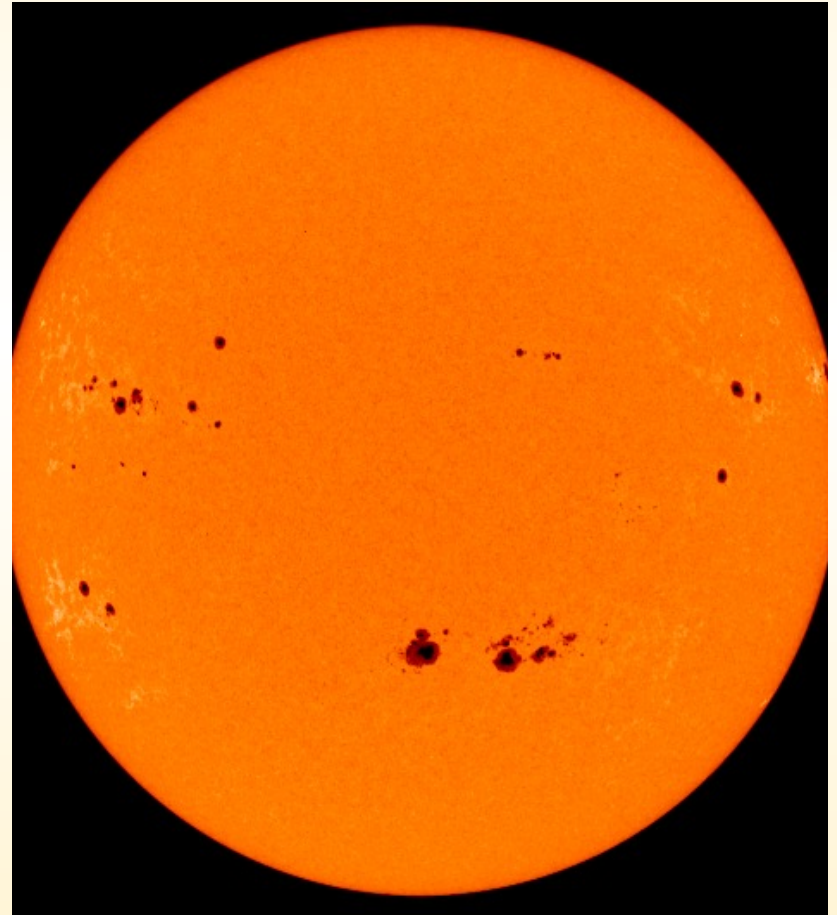
Las manchas solares: manchas oscuras en la superficie donde la temperatura es más fría.

Granulación: la parte superior de las células de convección vista como "burbujas" en la superficie solar



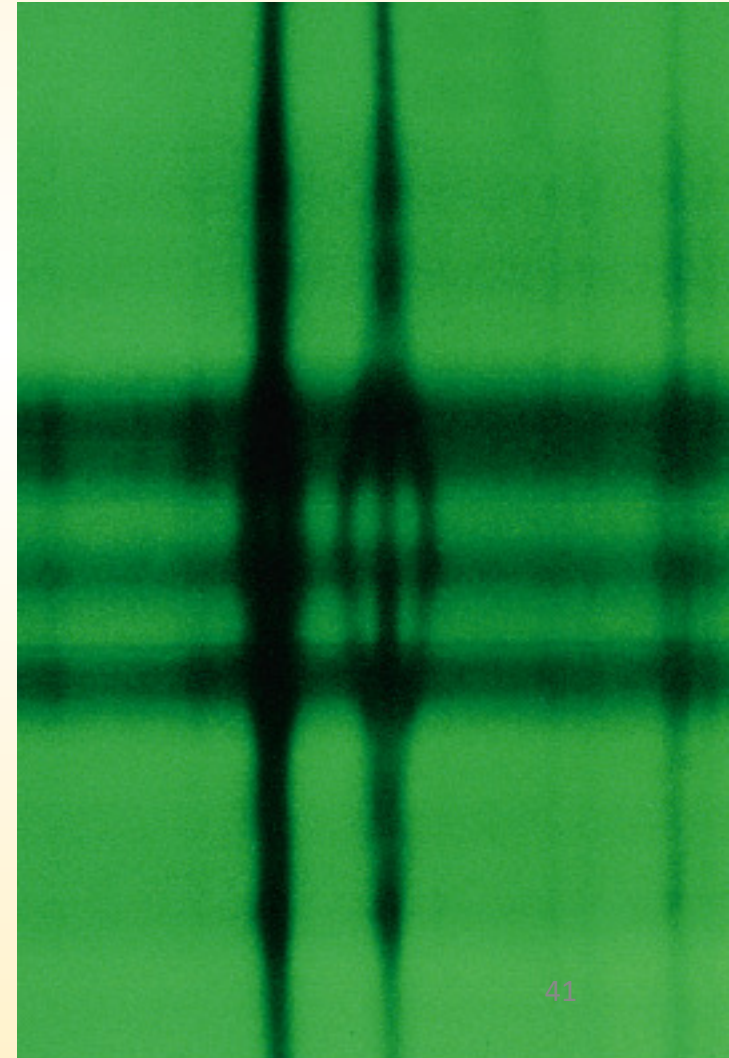
Sunspots – Manchas Solares

- Las manchas solares se presentan en pares.
- Los pares se agrupan y giran alrededor del Sol.
- Las manchas solares aparecen y desaparecen en un ciclo de 11 años.

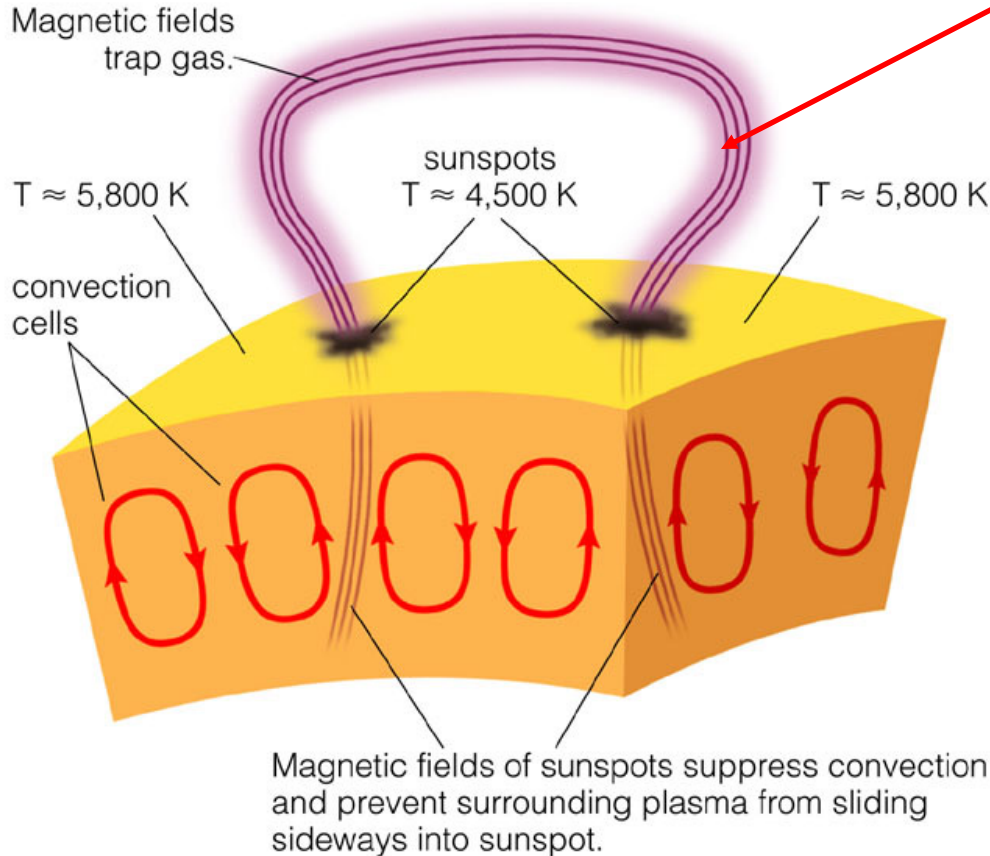


¿Qué causa las manchas solares?

- La respuesta está en sus espectros.
- Líneas de absorción se dividen en tres.
- Este efecto Zeeman es evidencia de fuertes campos magnéticos.



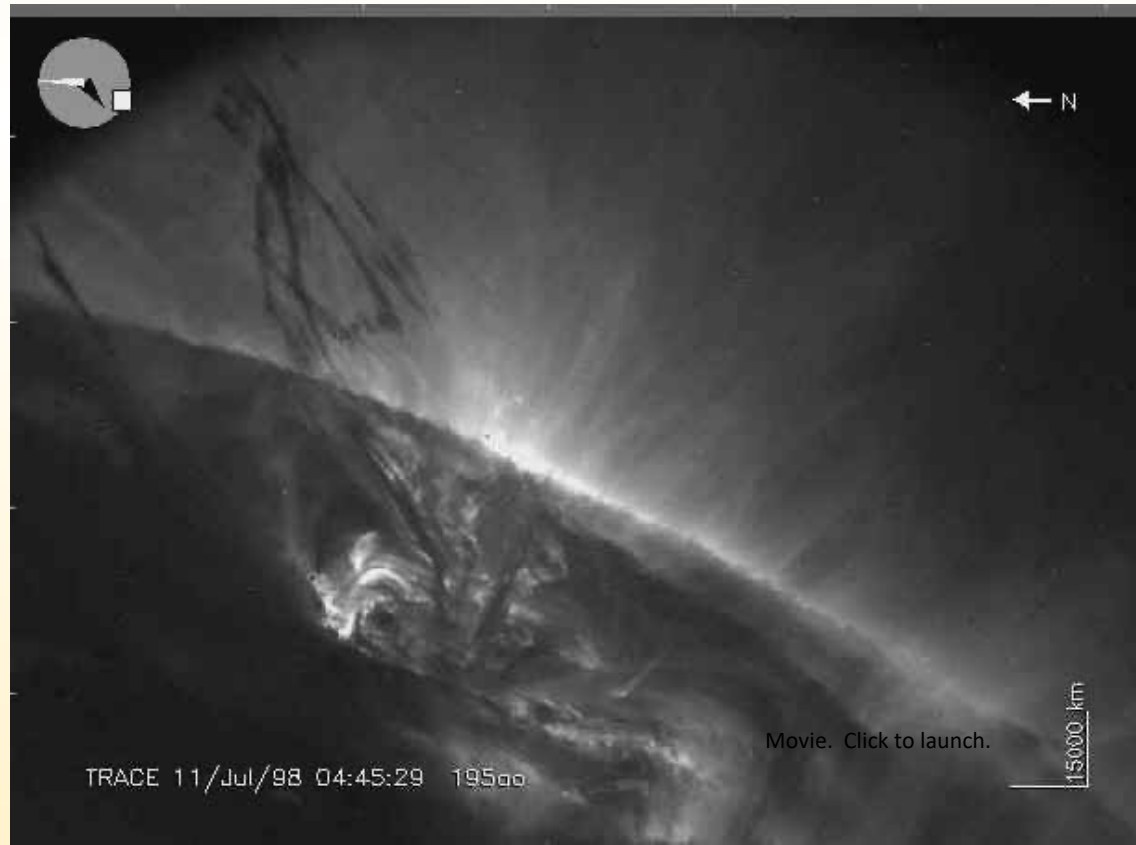
¿Qué causa una mancha solar?



- El campo magnético ralentiza la convección
- Menos calor se transporta a la superficie, de modo que esta parte de la fotosfera es más fría

Características coronales

Las protuberancias - gas atrapado en los campos magnéticos se calienta y se eleva a través de la cromosfera a la corona



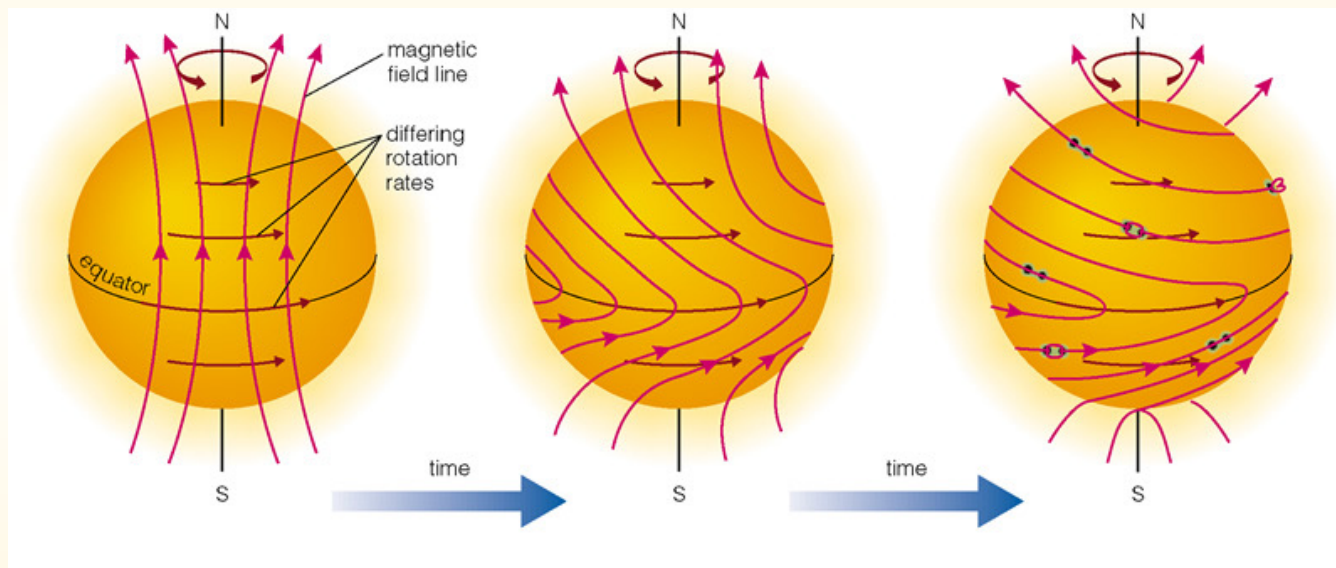
Características Coronales

- **Borrascas solares** (solar flares) – cuando se rompe un bucle magnético, libera materia y energía en el espacio



Rotación diferencial

El Sol no gira como un cuerpo sólido (como la Tierra). El ecuador gira más rápido que los polos.

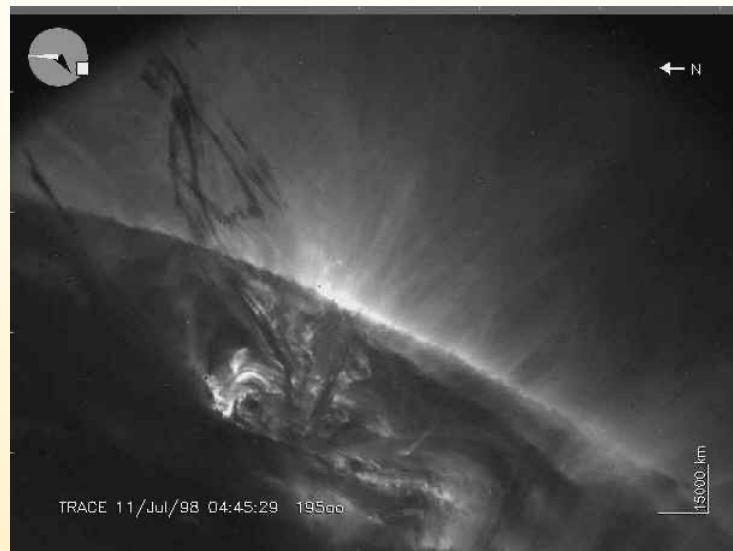


Periodo de Rotación:

25 días (ecuador) vs. 30 días (polos)

Actividad Solar

- La fotosfera del Sol está cubierta con manchas solares.
- Las manchas solares no son constantes, sino que aparecen y desaparecen.
- Lo hacen en un ciclo.
- Se repite cada 11 años.
- El campo magnético del Sol cambia su polaridad cada 11 años por lo que el ciclo completo se repite cada 22 años



Ciclo de las manchas solares

