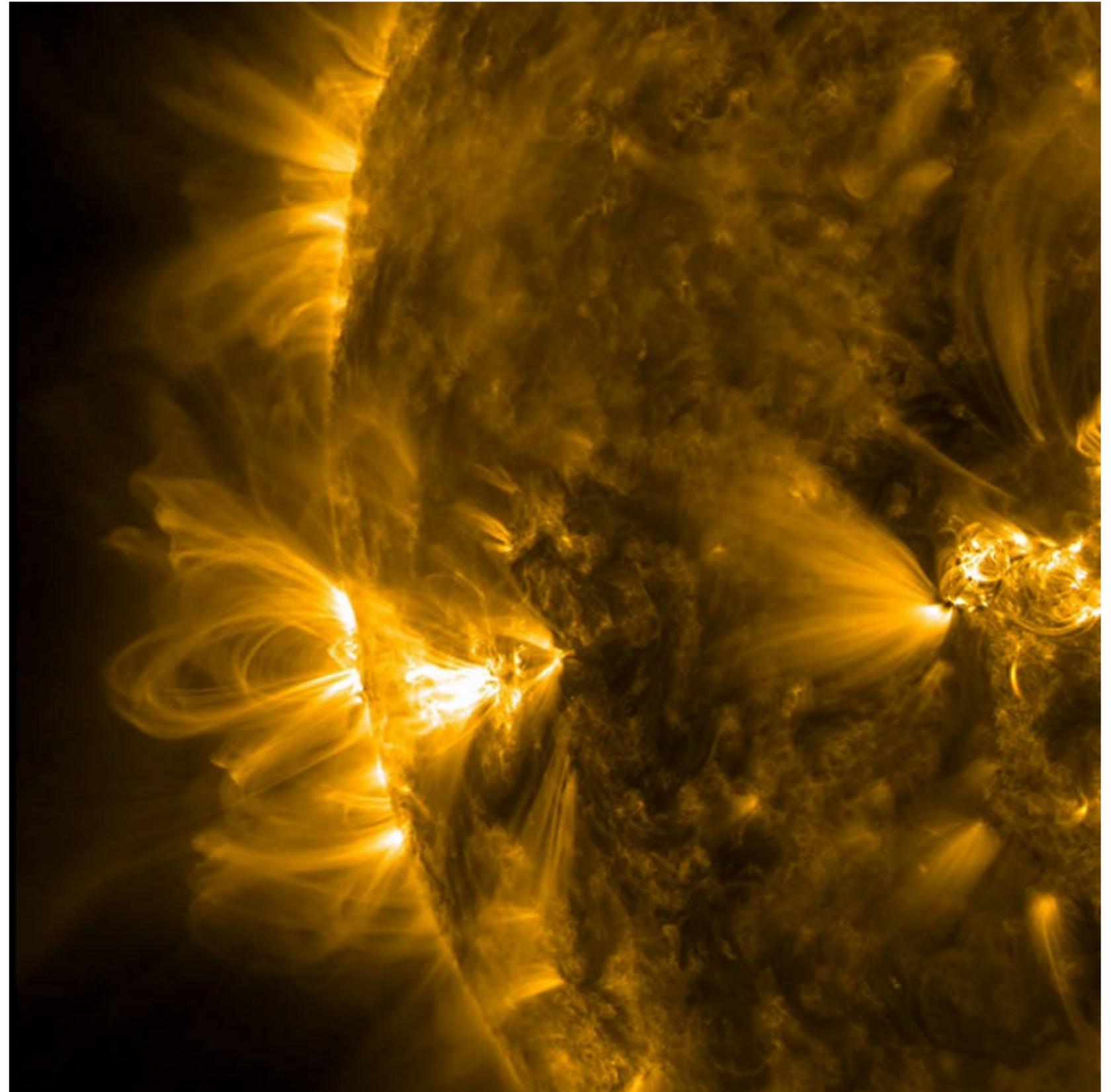


# Clase anterior

- Ecuaciones MHD. Descripción fluidística de un plasma.
- Creación de campo B. Efecto Dínamo.
- Modelo *stretch — twist — fold*.
- Modelo de campo medio. Efecto alpha.
- Turbulencia micro. Flujos helicoidales.

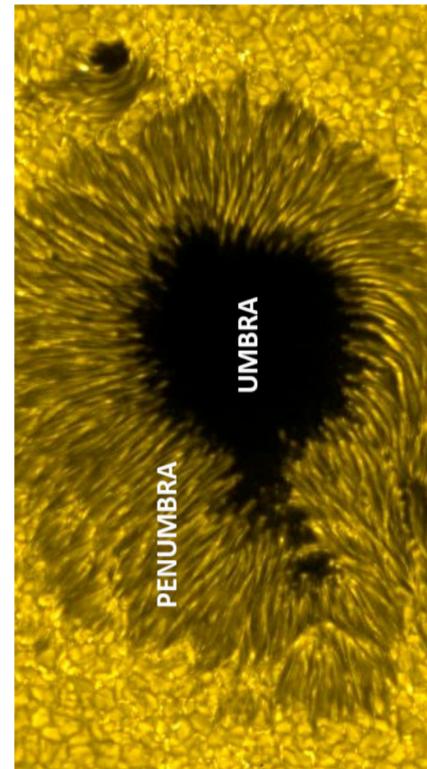
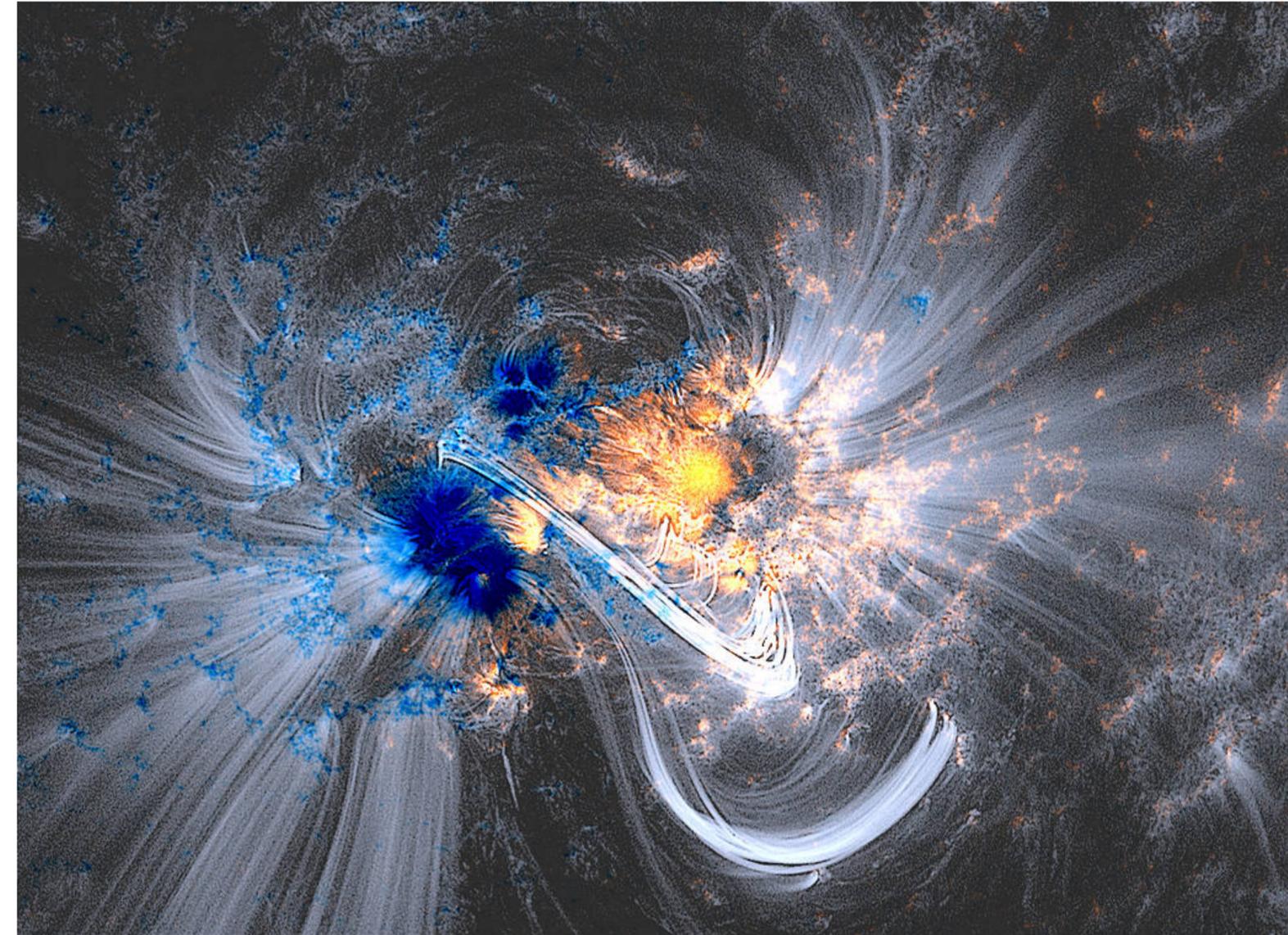
# Campo magnético solar

- La corona es la capa mas externa de la atmósfera solar.
- Es un plasma (gas electricamente cargado) de alta temperatura ( $T=2 \cdot 10^6$  K) y baja densidad ( $n=10^9$  cm<sup>-3</sup>).
- Imágen en rayos X del satelite SDO (Solar Dynamics Obs.), 2014.
- El plasma es confinado por el campo magnético solar. Compleja superposición de arcos magnéticos.
- En la regiones oscuras (agujeros coronales) se origina el viento solar.
- Uno de los temas de investigación actuales en Física Solar es el estudio de mecanismos de calentamiento del plasma coronal.

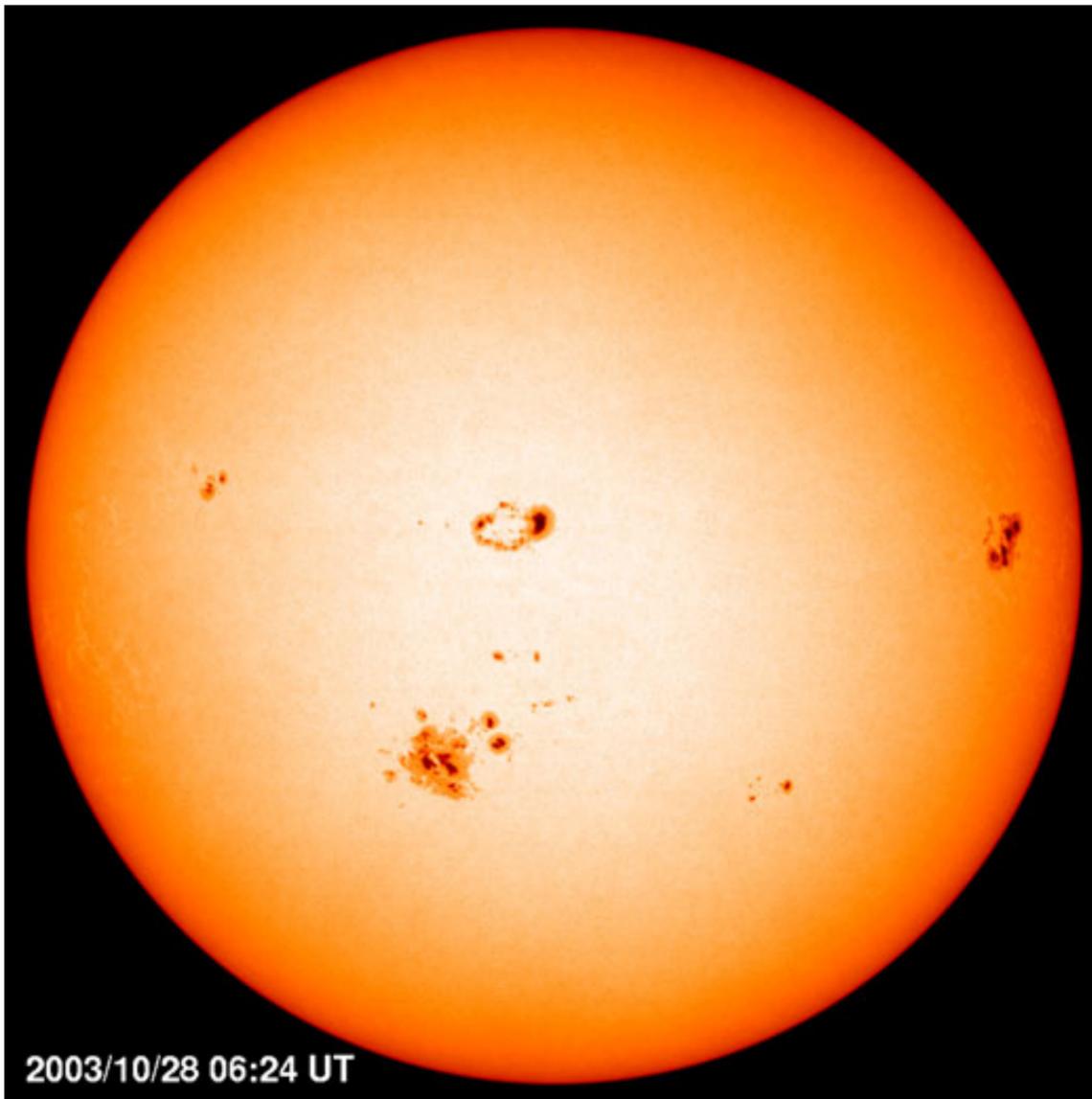


# Manchas solares

- Esta imagen combina la intensidad de emisión en rayos X (SDO) con intensidad de campo magnético en superficie (**positivo** y **negativo**).
- La intensidad de campo magnético en superficie se mide indirectamente usando el efecto Zeeman.

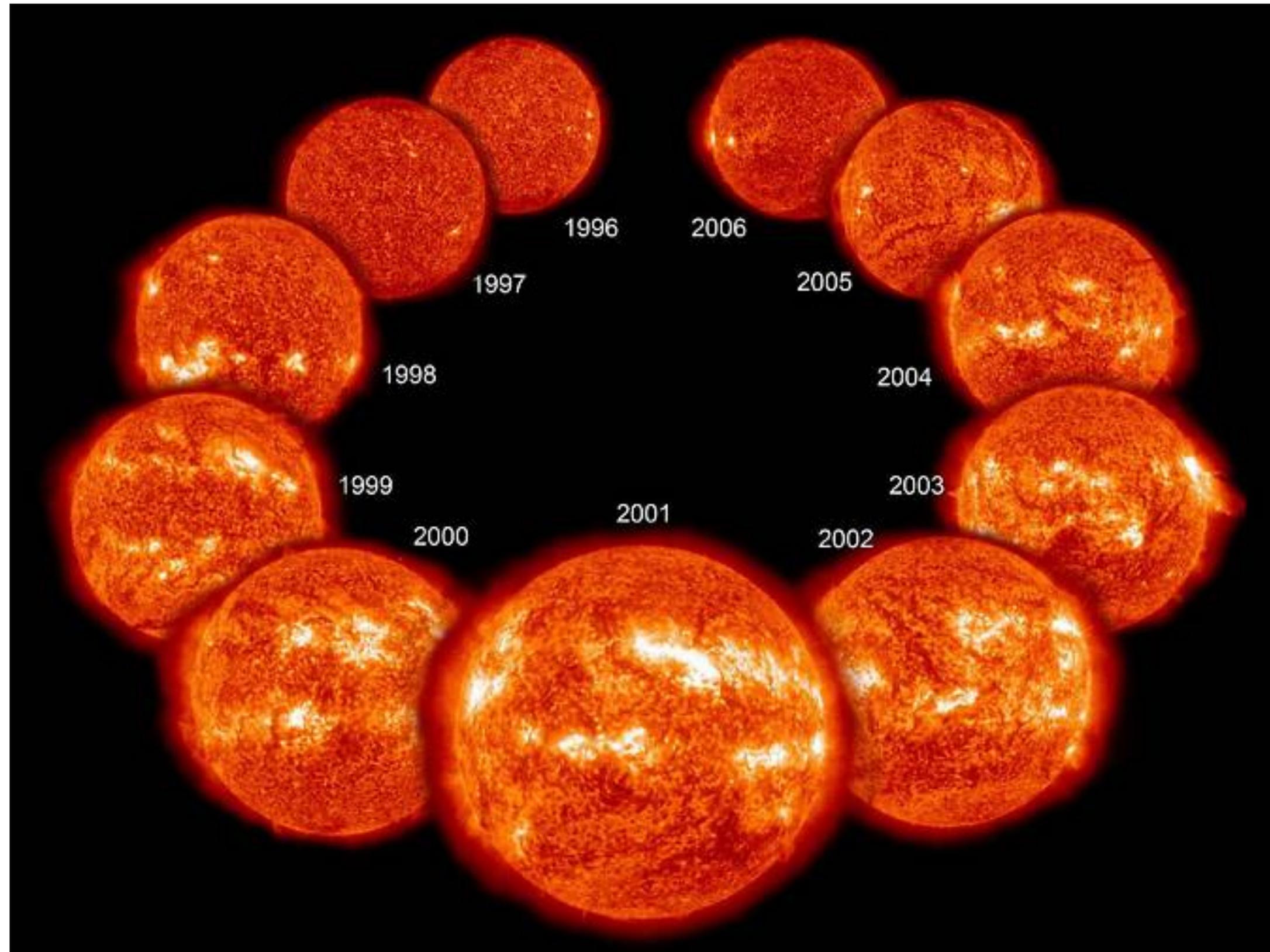


- Las manchas son concentraciones de campo magnético (1 - 3 kGauss) en la superficie solar, y son las bases de los arcos magnéticos.
- Las manchas nacen de a pares y con polaridades opuestas. Las manchas precedentes tienen la misma polaridad en cada hemisferio, que es opuesta a la del otro.



# Ciclo magnético solar

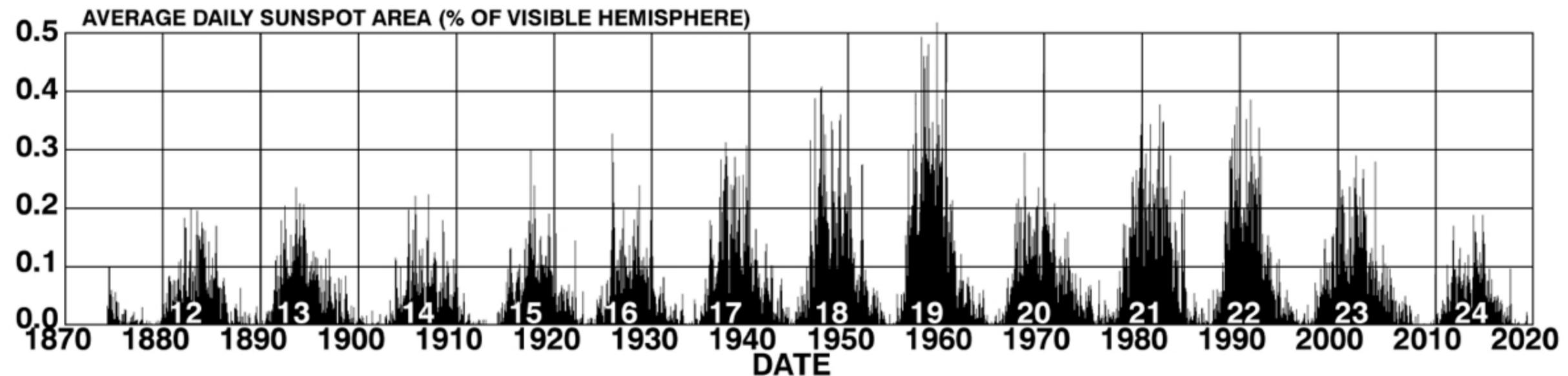
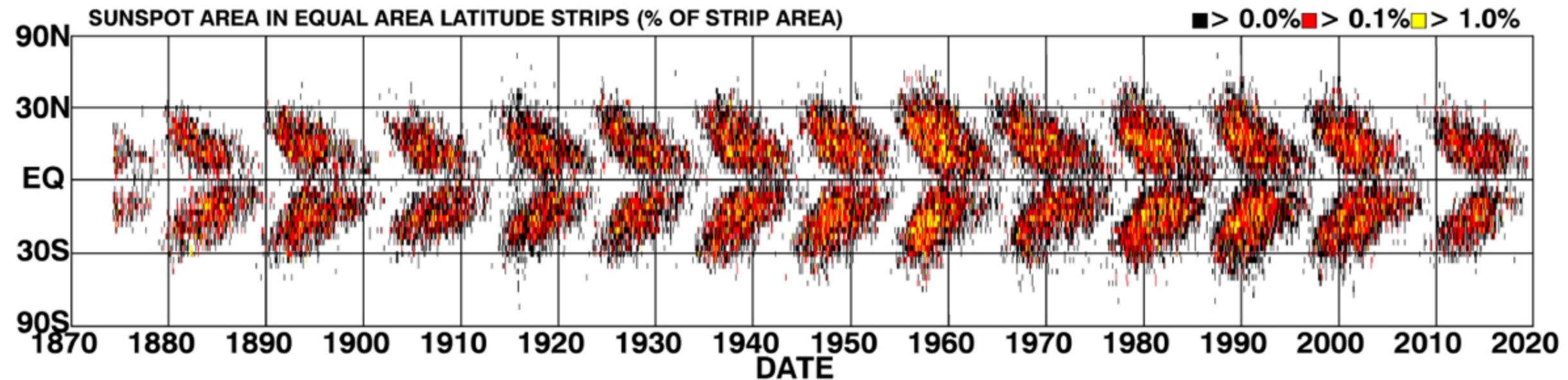
- Imágenes en rayos X del satélite SoHO (Solar Heliospheric Observatory) tomadas entre 1996 y 2006.
- Estas imágenes ponen de manifiesto el ciclo solar, cuyo período es de aprox. 11 años.
- Otro de los temas actuales de investigación, es el estudio del origen del campo magnético solar.
- Y por extensión, de los campos magnéticos en el espacio y en Astrofísica.



# Ciclo solar: diagramas de mariposa

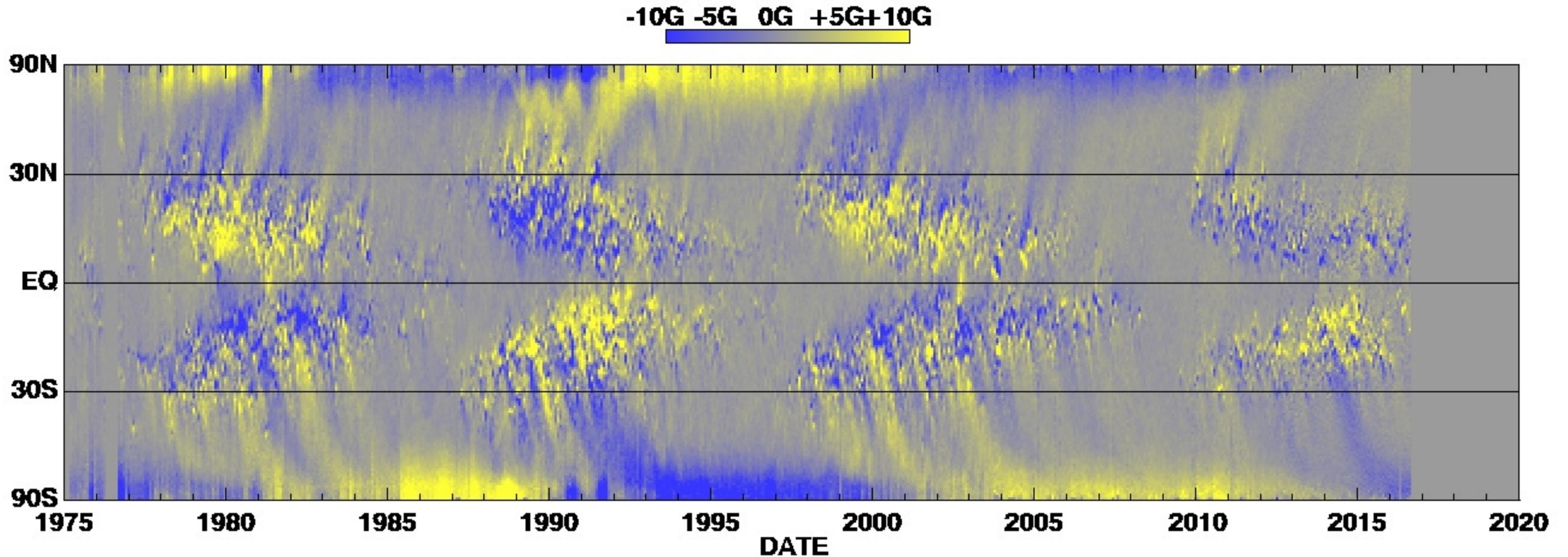
- En 1843 Schwabe reportó una periodicidad de 10 años en los registros de número de manchas vs. tiempo.
- El período del número de manchas medido actualmente es de alrededor de 11 años.
- Las manchas se generan en latitudes intermedias (aprox.  $30^\circ$ ) y migran hacia el Ecuador a lo largo del ciclo.

## DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



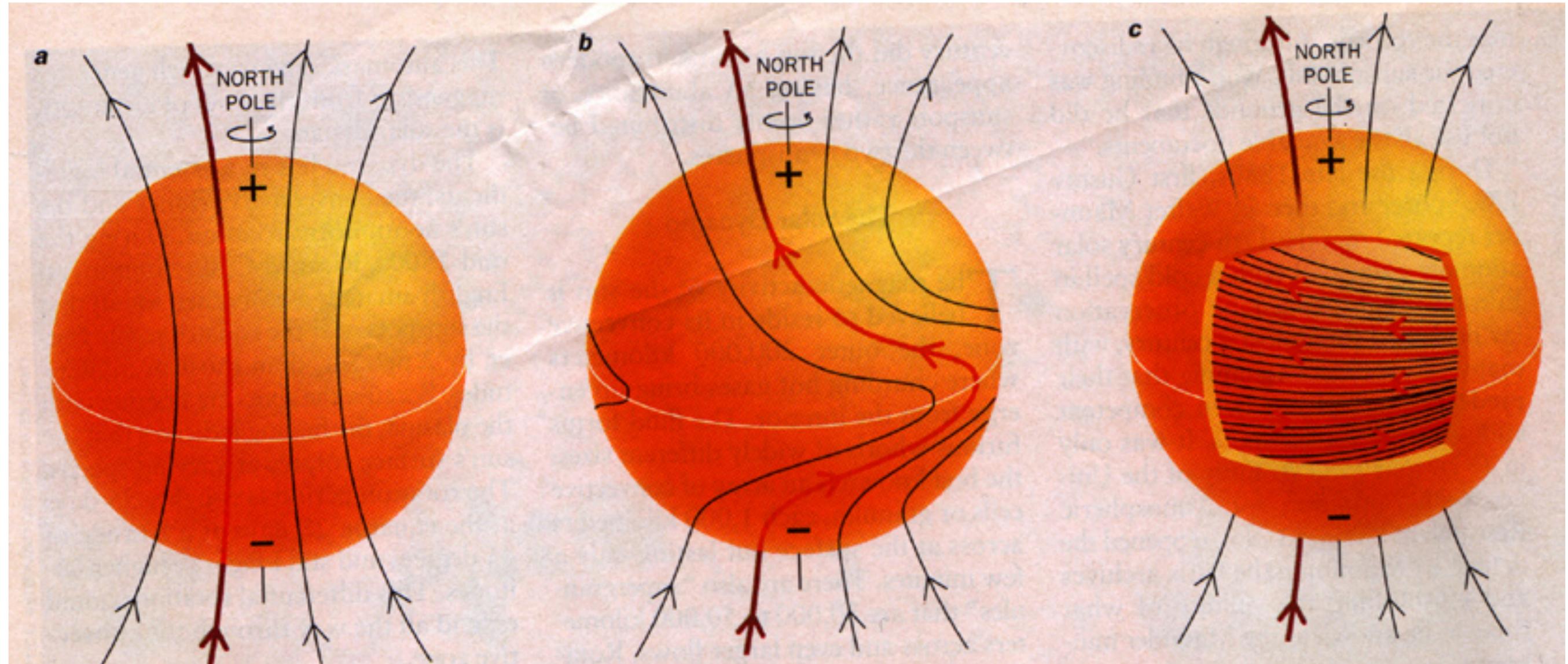
# Ciclo solar: diagramas de mariposa

- Las polaridades magnéticas se invierten entre un ciclo y el siguiente (ley de Hale).
- La imagen muestra el magnetograma de la dirección radial. La polaridad positiva en **amarillo** y la negativa en **azul**.
- La polaridad mas cercana al ecuador corresponde a manchas confinadas, mientras que la otra difunde hacia los polos.
- Noten la inversión del ciclo en los polos.



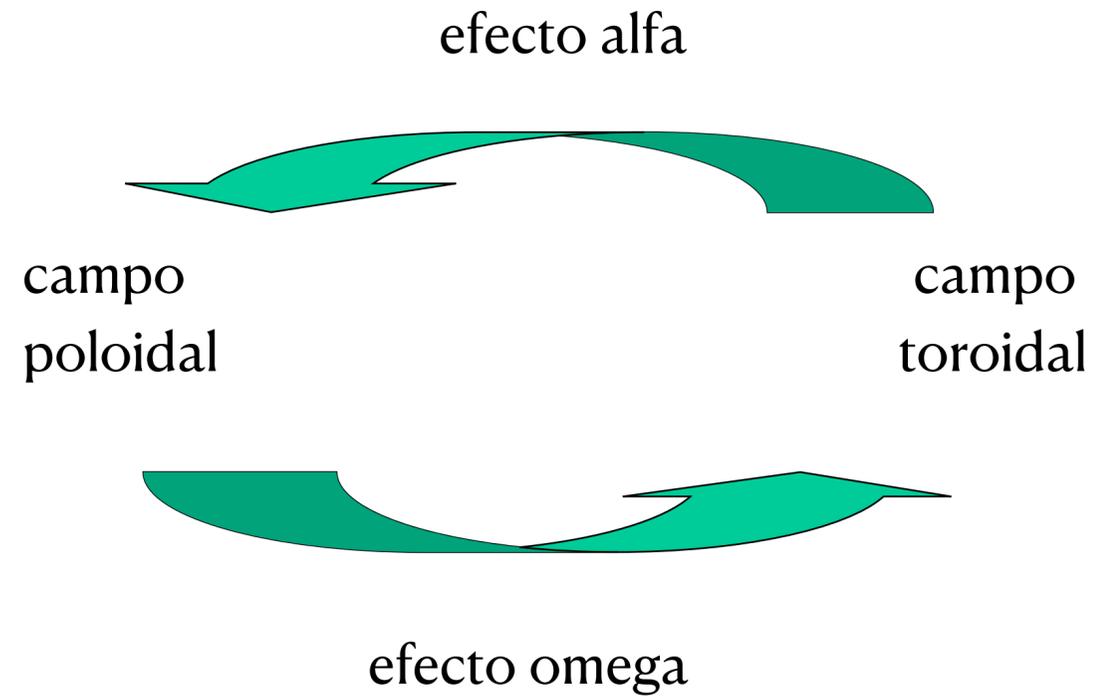
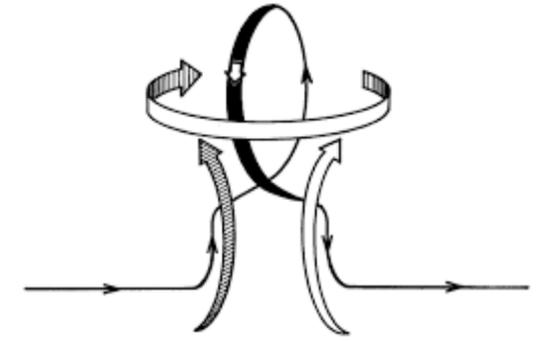
# Dínamos Alpha-Omega: efecto Omega

- El Sol rota un 20% mas rápido en el Ecuador que en los polos (rotación diferencial).
- Las líneas magnéticas son arrastradas y tensionadas por este campo de velocidades.

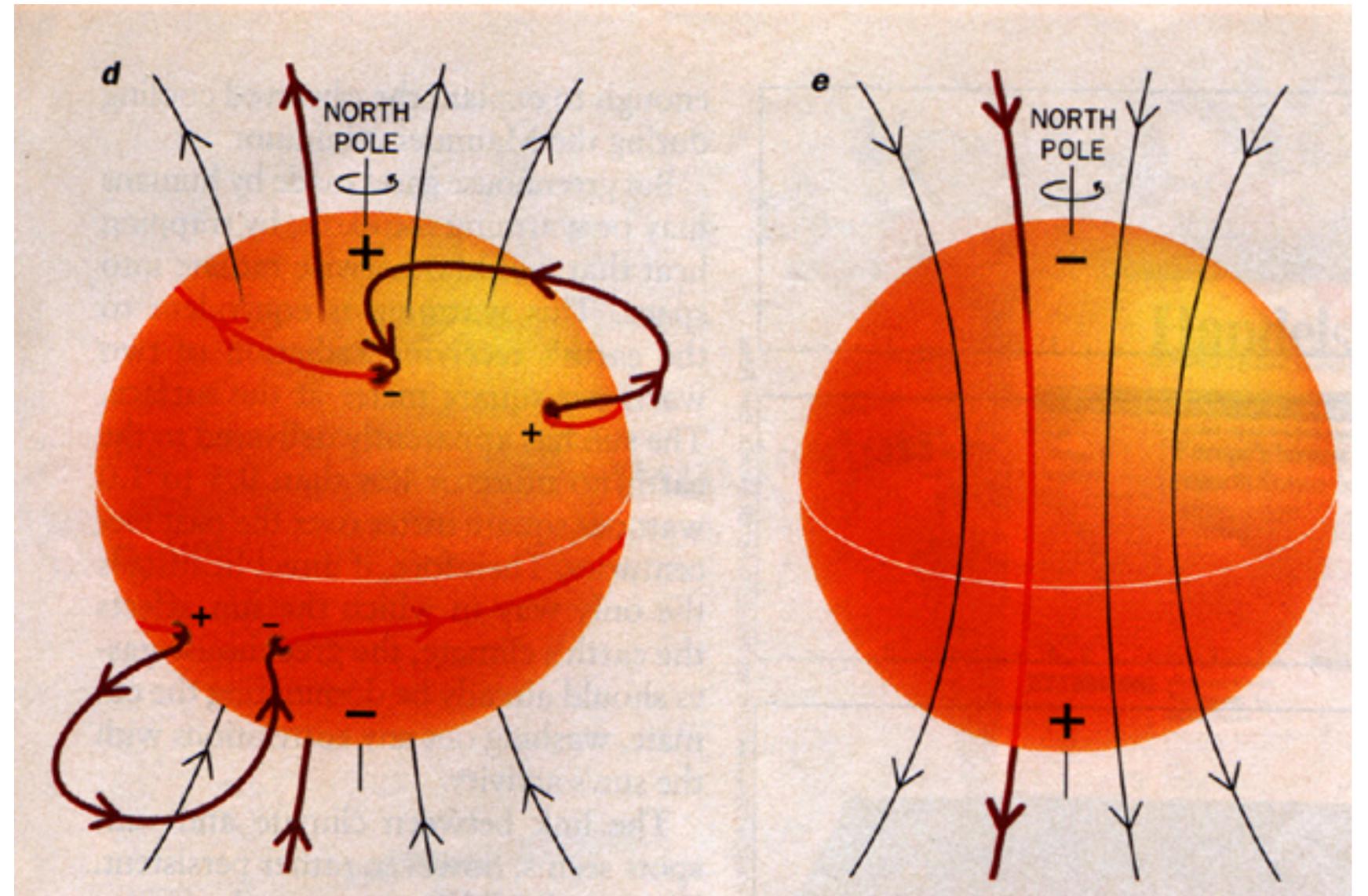


# Dínamos Alpha-Omega: efecto Alpha

- La tensión y torsión de las líneas produce la formación de “rulos” que emergen a la superficie.
- La fuerza de Coriolis sobre el flujo convectivo ascendente, produce la inclinación de los rulos (loops) respecto de la horizontal.

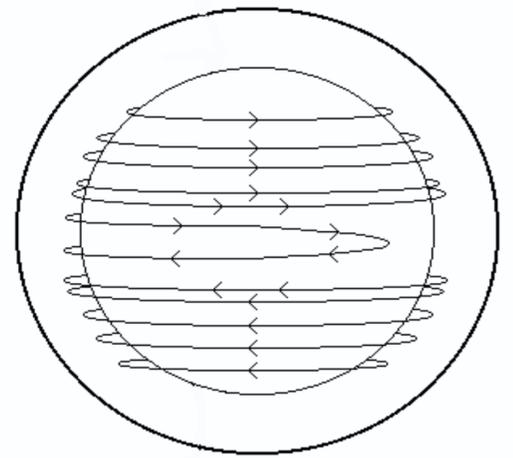


- La mancha mas cercana al polo, se cancela gradualmente con el campo inicial hasta invertir el dipolo.



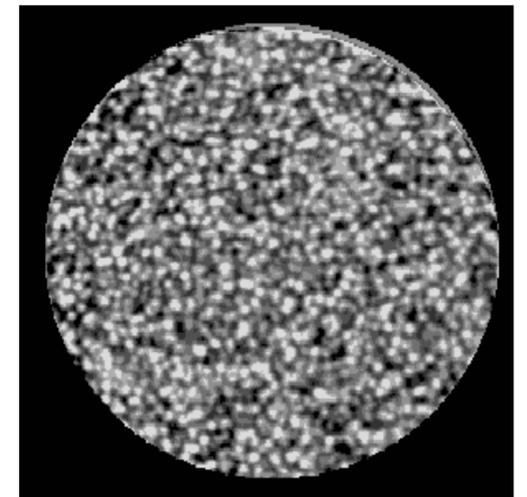
# Simulaciones numéricas

- Se integra numericamente la ecuación de inducción, suponiendo axi-simetría:  $\underline{B} = B_\phi \hat{\phi} + \underline{\nabla} \times (A \hat{\phi})$
- Se utilizan perfiles empíricos de rotación diferencial, convección fotosférica y flujo meridional.
- La fuerza de Coriolis sobre el flujo convectivo ascendente, produce la inclinación de los rulos (loops) respecto de la horizontal.

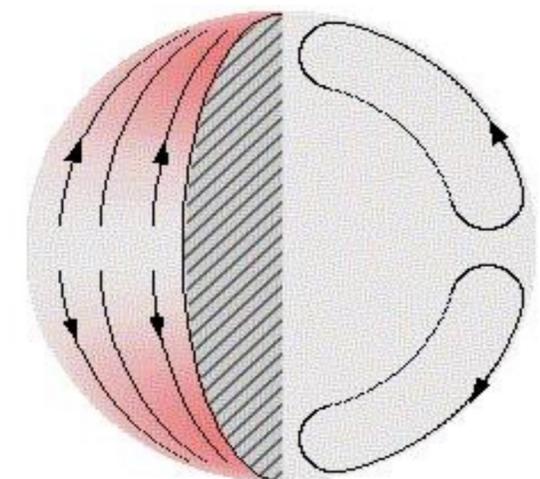


Rotación diferencial

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial B_\phi}{\partial t} &= -\underbrace{(U_r + \varepsilon \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta}) B_\phi - \varepsilon U_\theta \frac{\partial B_\phi}{\partial \theta}}_{\text{Flujo meridional}} + \underbrace{(\Delta\omega \cos\theta - \sin\theta \frac{\partial \omega}{\partial \theta}) A + \Delta\omega \sin\theta \frac{\partial A}{\partial \theta}}_{\text{Rotación diferencial}} + \underbrace{\frac{1}{\Re} \nabla_\theta^2 B_\phi}_{\text{Disipación}} \\
 \frac{\partial A}{\partial t} &= -\underbrace{(U_r + \varepsilon U_\theta \cot\theta) A - \varepsilon U_\theta \frac{\partial A}{\partial \theta}}_{\text{Flujo meridional}} + \underbrace{\alpha(B_\phi) B_\phi}_{\text{Convección micro}} + \underbrace{\frac{1}{\Re} \nabla_\theta^2 A}_{\text{Disipación}}
 \end{aligned}$$



Convección micro



Flujo meridional

where  $\Re = \frac{U_0 \delta R}{\eta}$ ,  $\varepsilon = \frac{\delta R}{R}$ ,  $\Delta\omega = \omega_{surf}(\theta) - \omega_{core}$ ,  $\alpha = \frac{\alpha_0 + \delta\alpha}{1 + B_\phi^2 / B_0^2} \sin(\theta) \cos(\theta)$

# Simulaciones numéricas

- Campo toroidal vs latitud y tiempo obtenidos en la simulación (Mininni & Gómez 2002, ApJ 573 454).
- En la convección se agregó un forzado estocástico con tiempos y longitudes de correlación típicos de celdas convectivas solares. Este nivel de estocasticidad habilita la ocurrencia de mínimos tipo Maunder.
- El comportamiento global es cualitativamente similar a las mariposas de los magnetogramas observados.
- La imagen inferior de una simulación 2D (Dikpati & Charbonneau 1999)

