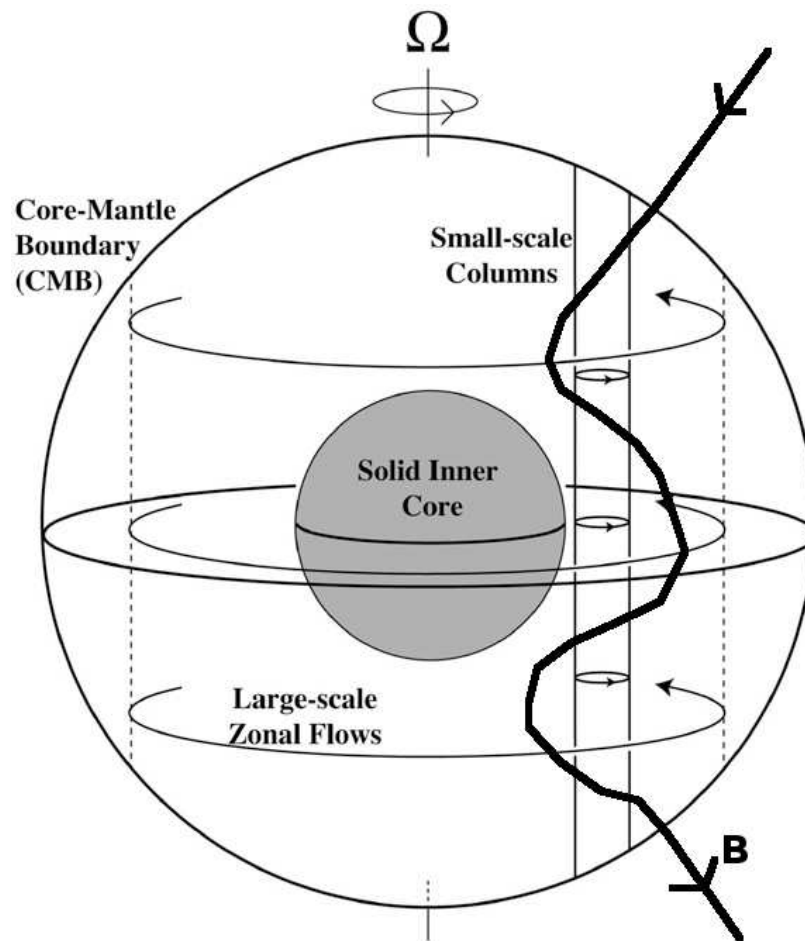


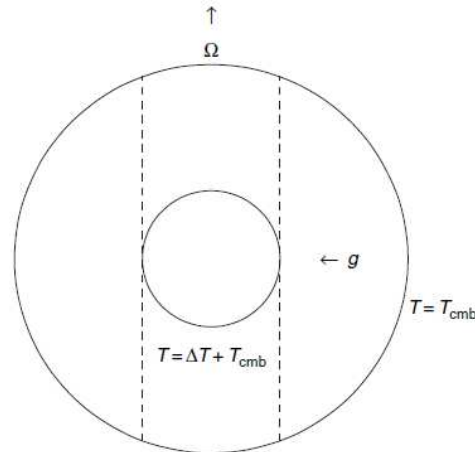
9 Geodinamos numéricos



9.1.1 Las ecuaciones del núcleo

● Esta sección presenta las ecuaciones para un núcleo girando, con convección, fuerzas de flotabilidad, y un sistema magnetohidrodinámica, que contiene lo siguiente:

1. Geometría esférica.
2. Flotabilidad térmica y química.
3. El efecto de rotación en los movimientos.
4. Campo geomagnético influencia los movimientos.



9.1.2 La ecuación de Navier-Stokes

$$\underbrace{\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}}_{\text{Cambio de flujo en el tiempo}} + \underbrace{\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u}}_{\text{Advección del flujo}} = \underbrace{-\nabla P}_{\text{Fuerza debido al gradiente de presión}} + \underbrace{\rho\nu\nabla^2\mathbf{u}}_{\text{Fuerza viscosa en el fluido}}$$

- Agregamos la fuerza de Coriolis

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} + \underbrace{2\rho(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u})}_{\text{Fuerza de Coriolis}} = -\nabla P + \rho\nu\nabla^2\mathbf{u}$$

- \mathbf{u} ahora es la velocidad del fluido en un marco de referencia rotacional a una velocidad angular $\boldsymbol{\Omega}$.
- La fuerza de Coriolis es debido al marco de referencia rotacional.
- P es la presión efectiva en el marco de referencia rotacional.

9.1.3 La fuerza de flotabilidad

- Los efectos de flotabilidad son tomados en cuenta, por ejemplo usando la aproximación de Boussinesq.
- Las perturbaciones de T cambian como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)T = \kappa \nabla^2 T$$

- El único efecto dinámico de T es a través de la gravedad \mathbf{g} actuando en perturbaciones de densidad $\rho\alpha T$.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} + 2\rho(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u}) = -\nabla P - \underbrace{\rho\alpha T \mathbf{g}}_{\text{Fuerza de flotabilidad}} + \rho\nu \nabla^2 \mathbf{u}$$

- T produce un cambio en la densidad, y entonces una fuerza de flotabilidad.

9.1.4 La fuerza de Lorentz

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} + 2\rho(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u}) = -\nabla P - \rho\alpha T\mathbf{g} + \underbrace{(\mathbf{J} \times \mathbf{B})}_{\text{Fuerza de Lorentz}} + \rho\nu\nabla^2\mathbf{u}$$

- La fuerza de Lorentz es debido al campo magnético actuando sobre las corrientes eléctricas en el fluido.
- Usando la ley de Ampere-Maxwell, con la aproximación magnetohidrodinámica:

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = \frac{1}{\mu_0}(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$$

- La evolución del campo magnético, como antes, es determinada por la ecuación de inducción magnética:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \eta\nabla^2\mathbf{B}$$

9.1.5 La dinámica del núcleo

- Las ecuaciones que gobiernan la dinámica del núcleo son:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} + 2\rho(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u}) = -\nabla P - \rho\alpha T\mathbf{g} + (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) + \rho\nu\nabla^2\mathbf{u}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)T = \kappa\nabla^2 T$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \eta\nabla^2 \mathbf{B}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

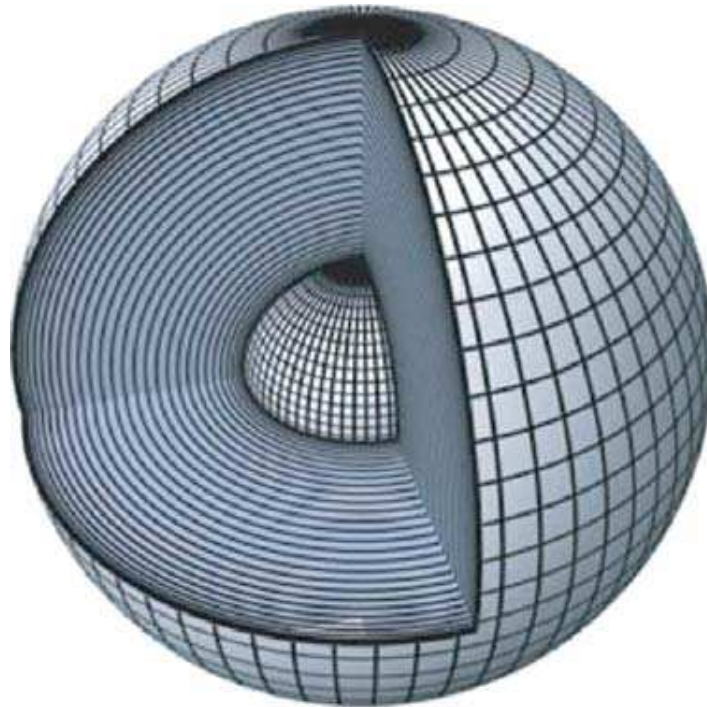
- Junto con las ecuaciones, se necesitan las condiciones de borde: el campo de velocidades y condiciones sobre T y \mathbf{B} en las fronteras núcleo-manto y núcleo interno-núcleo externo.
- Se puede modelar este sistema numéricamente.

9.2 Métodos para una solución numérica

- Para una solución completa a la geodinamo, hay que resolver las ecuaciones de la dinámica del núcleo, simultáneamente.
- Eso no se puede hacer analíticamente, entonces las ecuaciones acopladas tienen que estar resueltas numéricamente, bajo las condiciones de borde del sistema.
- Se puede aplicar una solución usando elementos finitos.
- Se necesita una escala espacial suficientemente fina para representar las estructuras de longitud de onda corta (flujo debido a la convección).
- Se necesita un paso de tiempo suficientemente corto para capturar la dinámica más rápida como las ondas magnéticas.
- Los computadores todavía no son suficientemente poderosos (pero casi ...) para simular los procesos en el núcleo terrestre con precisión.

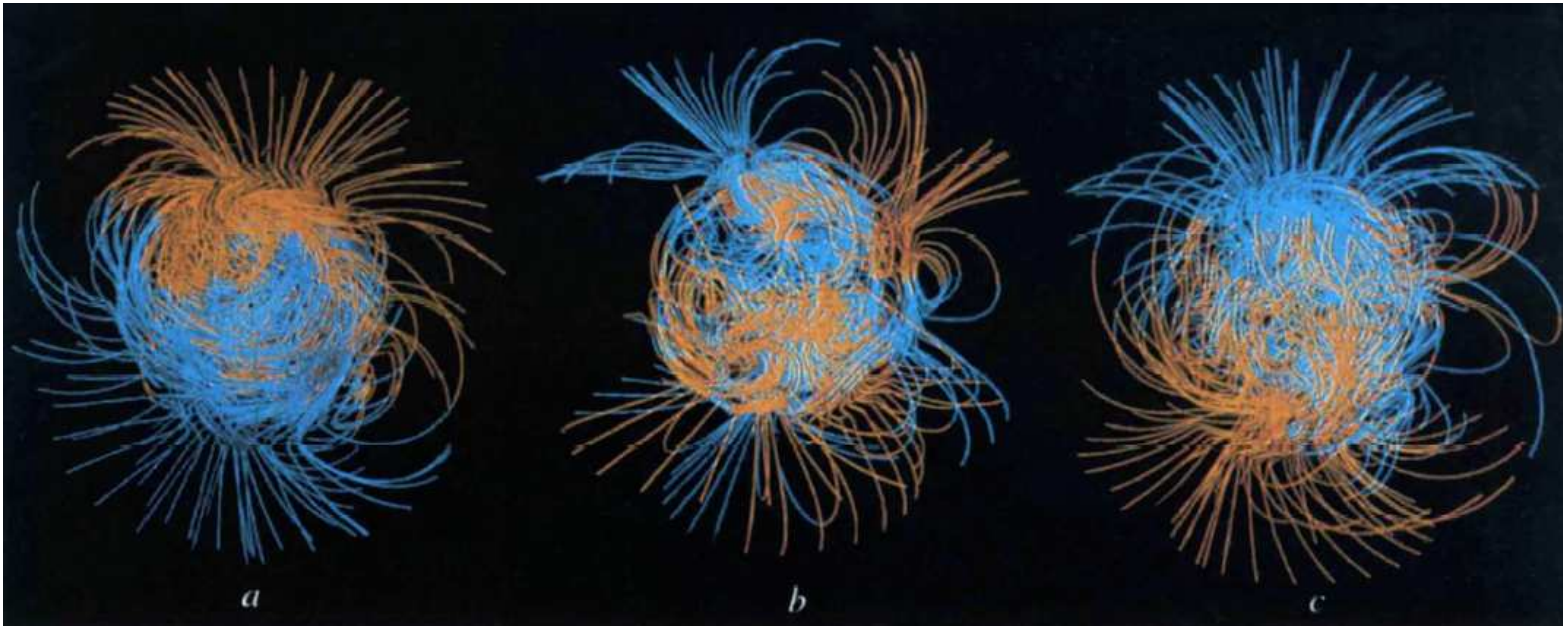
9.2 Métodos para una solución numérica

- La solución numérica requiere la discretización del flujo continuo y los campos de temperatura y del campo magnético.

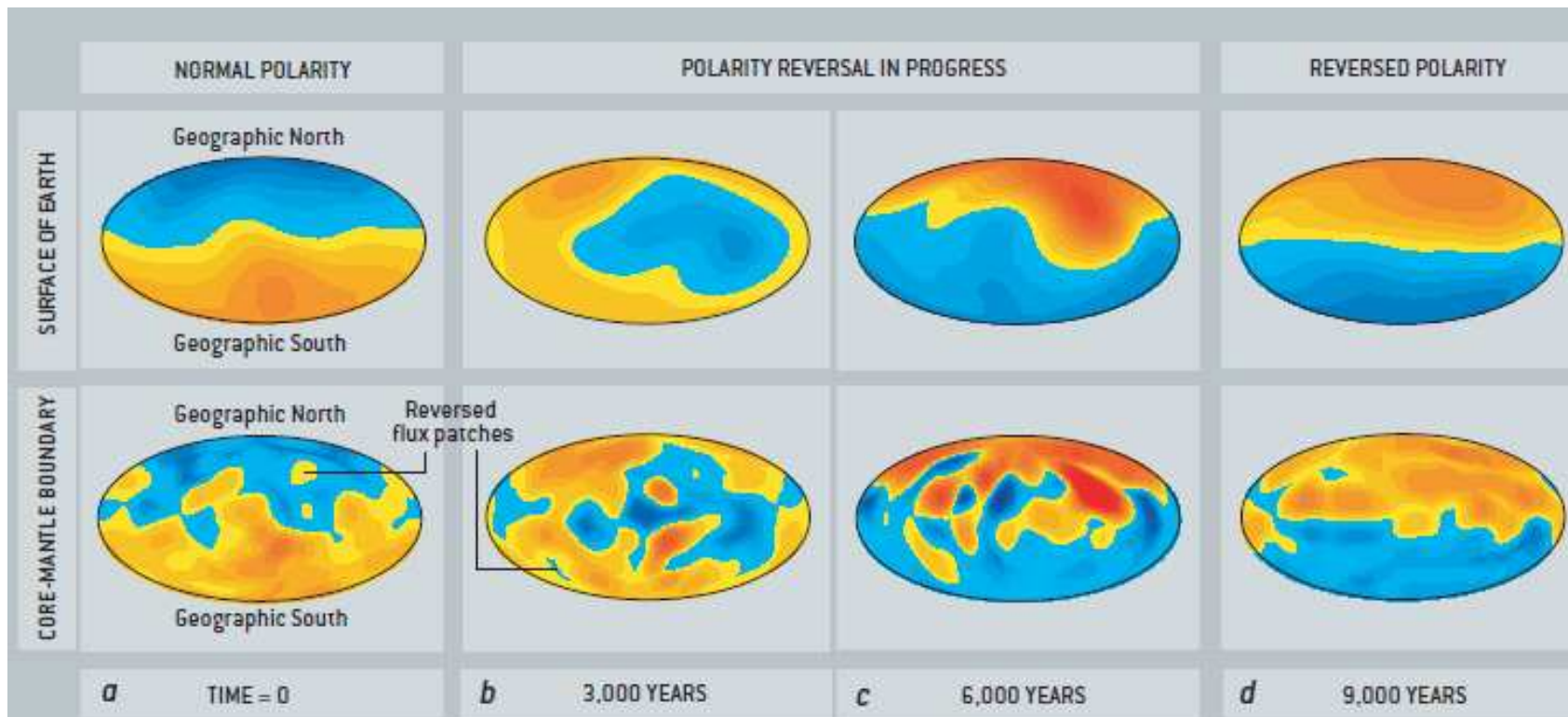


9.3.1 Dinamo numérico Glatzmaier-Roberts

- En 1995, Glatzmaier y Roberts produjeron el primero modelo 3-D de la geodinamo.
- Su modelo era dominado por un dipolo, pero también sufrió excursiones y una inversión.



9.3.2 Dinamo numérico - inversiones



MAGNETIC FIELD MAPS start off with normal polarity, in which most of the overall magnetic flux points out from the core (yellow) in the Southern Hemisphere and in toward the core (blue) in the Northern Hemisphere (a). The onset of the reversal is marked by several areas of reversed magnetic flux (blue in the south and yellow in the north), reminiscent of the reversed flux patches now forming on the earth's core-mantle boundary. In about 3,000 years the reversed flux patches

have decreased the intensity of the dipole field until it is replaced by a weaker but complex transition field at the core-mantle boundary (b). The reversal is in full swing by 6,000 years, when the reversed flux patches begin to dominate over the original polarity on the core-mantle boundary (c). If viewed only at the surface, the reversal appears complete by this time. But it takes an additional 3,000 years for the dipole to fully reverse throughout the core (d).

(From Glatzmaier and Olson, 2005)

9.4 Geodinamos - futuro trabajo

- Dinamos dipolares que sufren inversiones hasta ahora solamente se encuentra en modelos dinámicos muy diferentes de los que se esperan para la Tierra.
- La variación secular y las estructuras de trenes de ondas ecuatoriales hasta ahora no se puede reproducir con las simulaciones.
- Con mayor potencia computacional, se puede modelar las estructuras a una escala mas finita.
- Pero todavía los regímenes son lejos de las condiciones terrestres.
- Nuevos datos con mayor precisión y con mayor resolución espacial y temporal son necesarios (por ejemplo SWARM, Julio 2012).
- También hay que mejorar el registro de la historia del campo geomagnético.