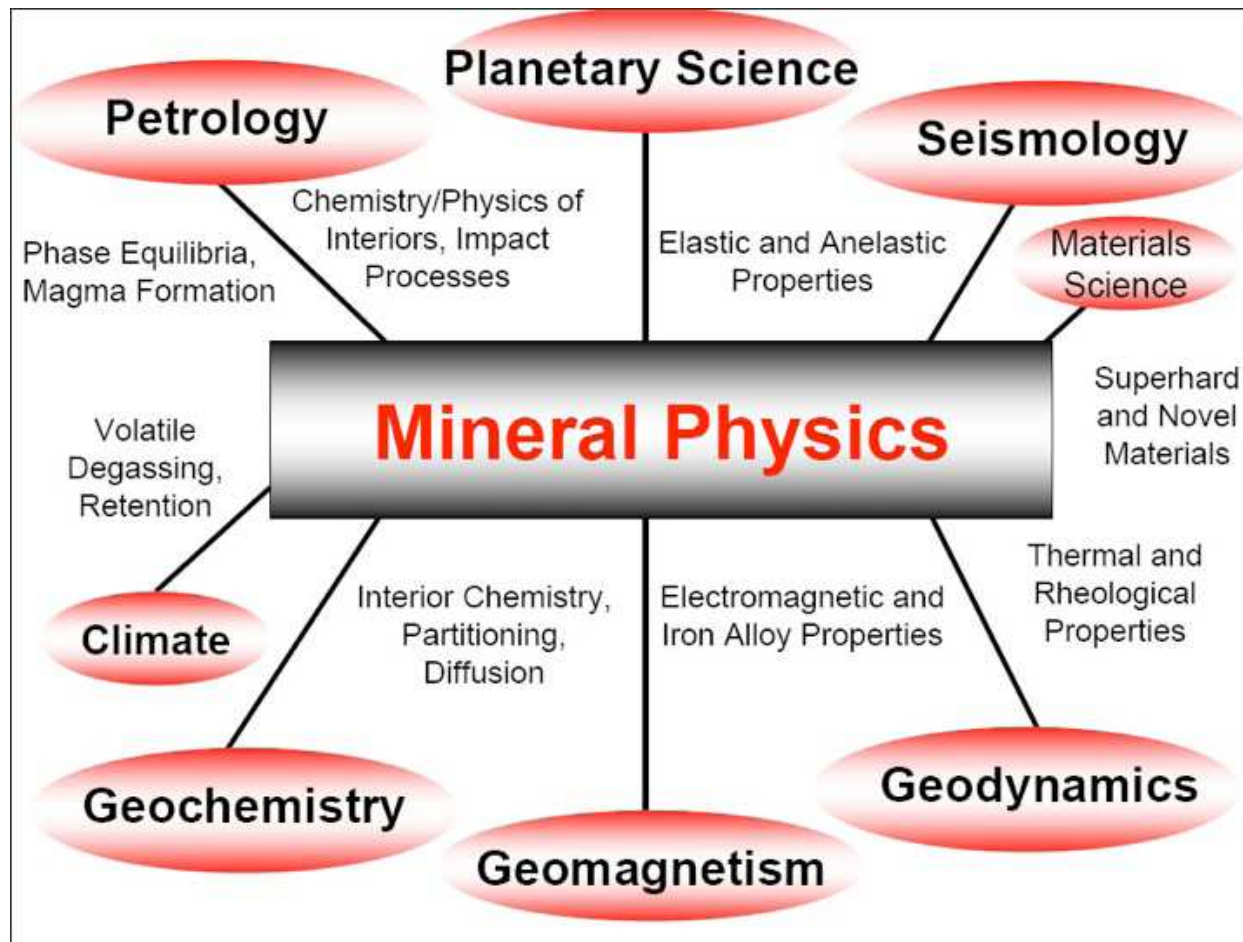


2 La mineralogía de la Tierra



2.1.1 El rol de mineralogía para el núcleo

- Para el estudio del núcleo terrestre debemos:
 1. Determinar las minerales responsables para las propiedades observadas del núcleo.
 2. Determinar los parámetros elásticos de los materiales del núcleo de las observaciones sísmicas.
 3. Determinar la capacidad calorífica, viscosidad, conductividad térmica y eléctrica, y la temperatura de fusión para estudios de la geodinamo.
- La mineralogía física involucra usando experimentos y calculaciones para determinación de fases estables para minerales.
- La predicción de las propiedades físicas del núcleo involucra experimentos sobre aleaciones de hierro a altas P, T, y la extrapolación del comportamiento de las minerales a menor P, T.

Los presiones dentro de la Tierra: ~ 135 GPa en la frontera N-M; ~ 330 GPa en la frontera NI-NE; ~ 360 GPa en el centro.

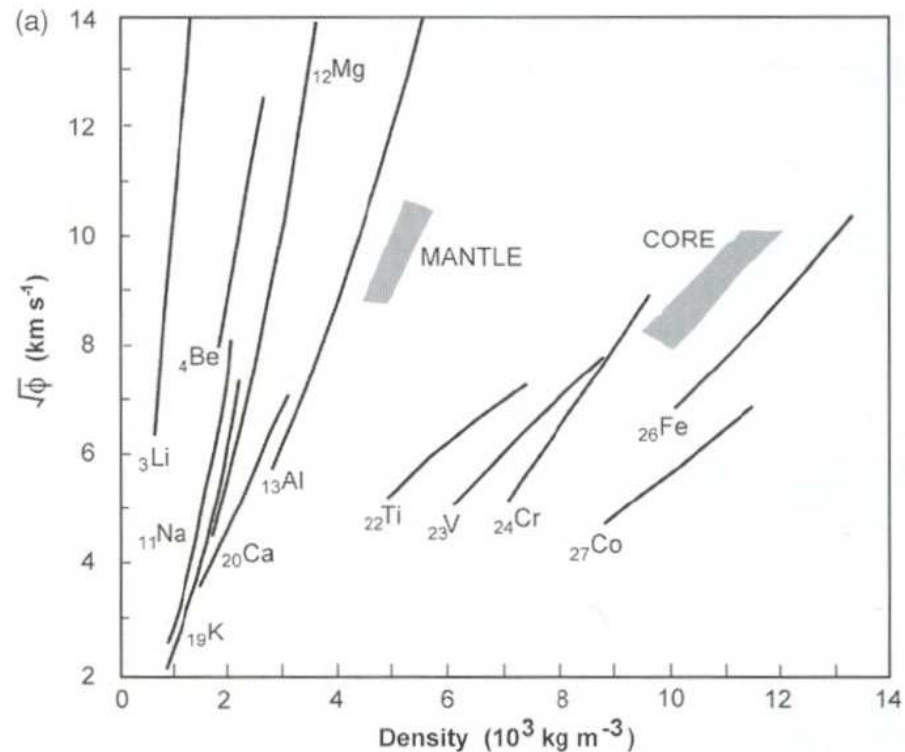
Las temperaturas dentro de la Tierra: ~ 4000 K en la frontera N-M; ~ 5500 K en la frontera NI-NE; ~ 6000 K en el centro.

2.1.2 Meteorito de hierro-níquel



- El meteorito primordial se enfrió muy lento, los cristales individuales crecen a un tamaño de \sim cm.
- Existen dos fases, una con relativamente poco Ni, y por eso se observa un patrón de Widmanstätten.
- Existe la presencia de olivino. ¿Este meteorito es representativo del borde núcleo-manto?

2.1.3 Las velocidades sísmicas - experimentos



- Birch (1968) analizó las velocidades sísmicas en comparación con densidad.
- El mostró que hierro debería estar en una aleación con elementos mas livianos para explicar las observaciones de ρ y Φ en el núcleo.

2.2.1 La termodinámica

- La termodinámica es una teoría que describe la respuesta de un material a cambios en sus condiciones ambientales, por ejemplo en T y P.
- La entropía, S , es un estado conservado por la transferencia reversible de calor. Se puede pensar en entropía como una medida de cuán cerca un sistema termodinámico está de su punto de equilibrio.

- Definiciones:

dU es el cambio en la energía interna de un sistema cerrado

dQ es el calor absorbido por un sistema cerrado

dW es el trabajo hecho en un sistema cerrado

- Los leyes de la termodinámica:

1. $dU = dQ + dW = dQ - PdV$
2. $dQ \leq TdS$,
donde $dQ = TdS$ para un proceso reversible
3. $S \rightarrow 0$ cuando $T \rightarrow 0$

2.2.2 Propiedades observables

- Las observables medibles para minerales incluyen:
- La capacidad calorífica (volumen constante)

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_V$$

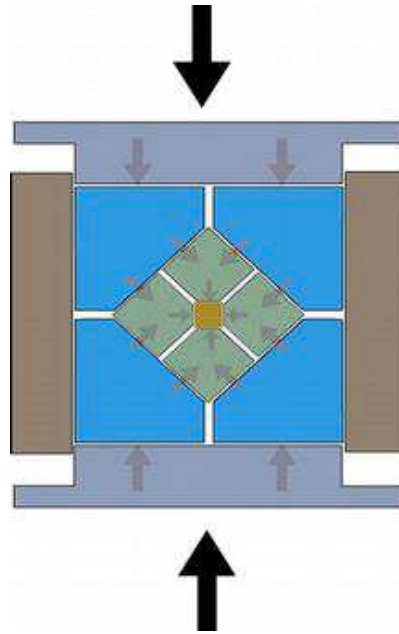
- El módulo de compresibilidad adiabático

$$\kappa = -V \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_S$$

- La expansibilidad térmica (constante P)

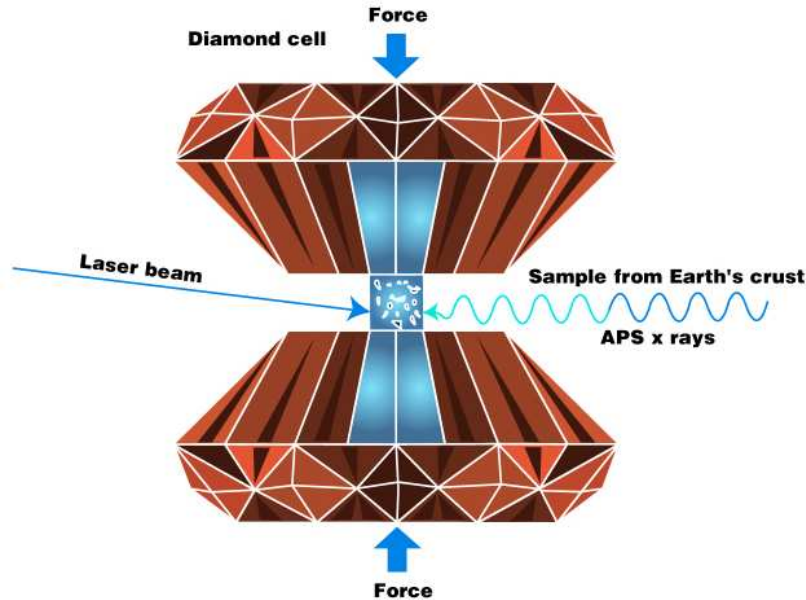
$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

2.3.1 Yunques



- Pistones usados para comprimir muestras hasta ~ 30 GPa.
- Se puede calentar el medio que comprime la muestra hasta ~ 3000 K.

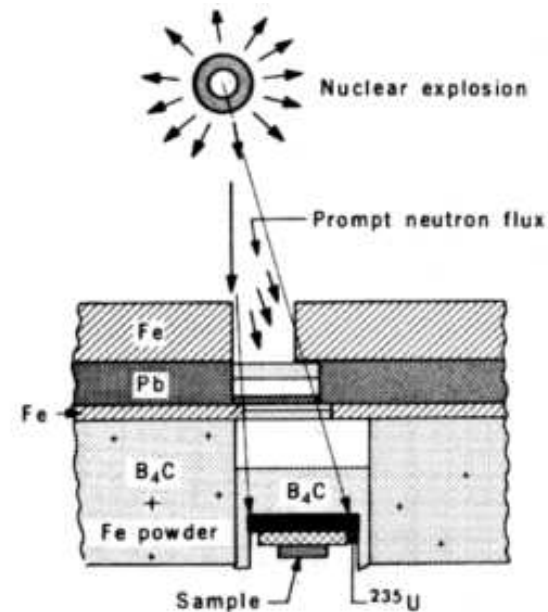
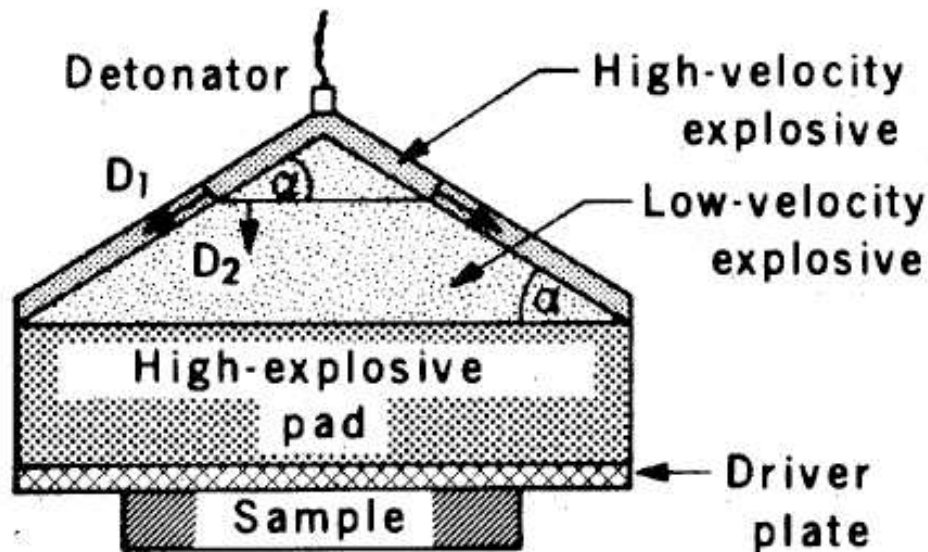
2.3.2 Yunques de diamante



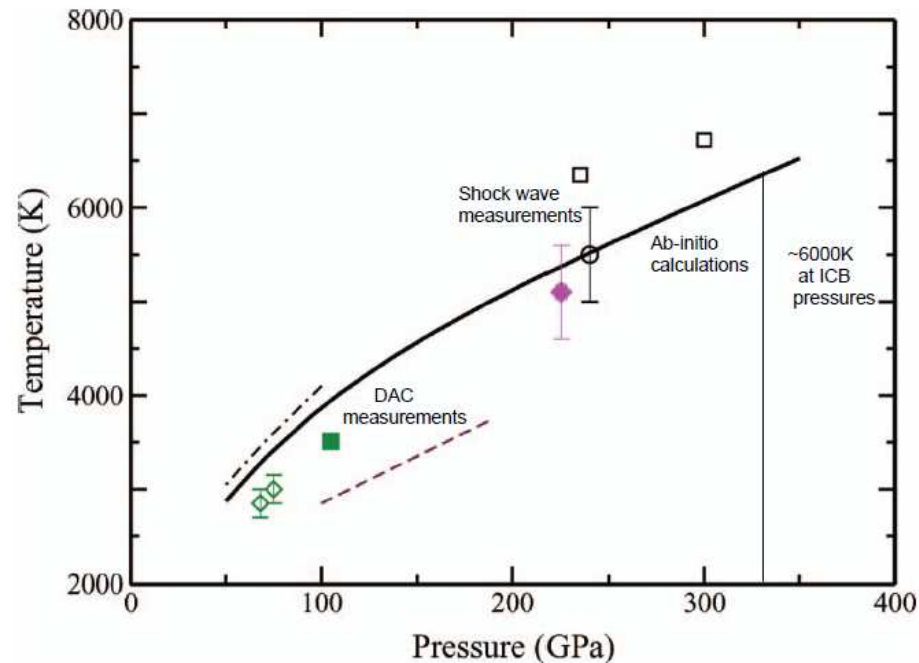
- El diamante puede resistir deformación a altas P .
- Alcanzan a presiones de ~ 300 GPa, pero el tamaño de la muestra es pequeña.
- Calentamiento con láser alcance a ~ 5000 K, pero la temperatura esta incierta.
- Espectroscopia o la difracción de rayos-X puede determinar las propiedades de la muestra.

2.3.3 Experimentos de ondas de choque

- Se pueden usar ondas de choque para obtener el comportamiento de material bajo alta P, T.
- Usando explosiones nucleares, alcance hasta ~ 400 GPa, pero hoy en día no se puede.
- Usando cañones que proyectan misiles a 2.5 km/s se puede generar ~ 50 GPa.
- La determinación de la temperatura de la muestra es complicada.



2.4 La temperatura de fusión de puro Fe



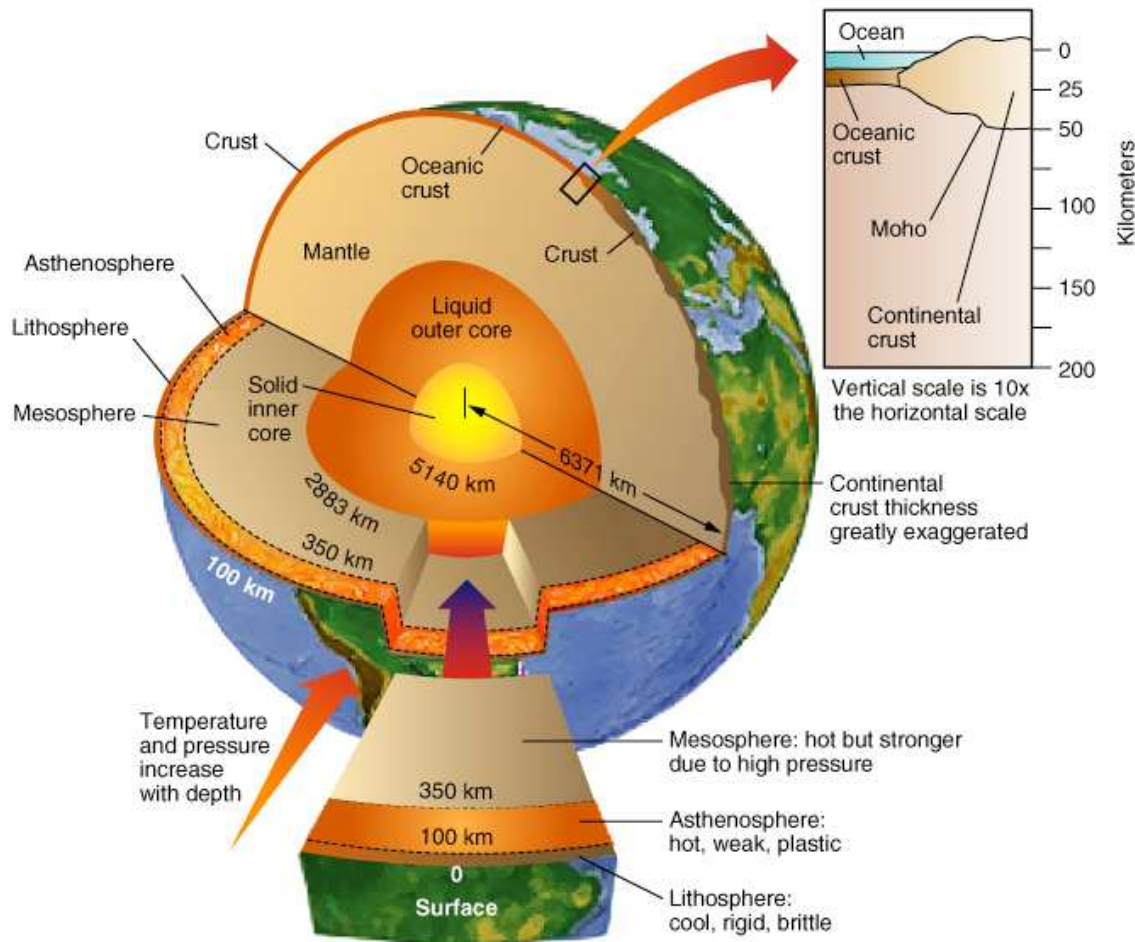
- Calculaciones (usando mecánica cuántica) apoyaron los resultados de los experimentos de yunques de diamante (DAC) y de ondas de choque.
- La influencia de elementos mas livianos en el núcleo probablemente baja la temperatura de fusión a ~ 5500 K.
- Alfè, D., (2007), *Theory and practice- The Ab Initio Treatment of High Pressure and Temperature Mineral Properties and Behavior. Treatise on Geophysics, 2.13, pp 359-387.*

2.5 Las propiedades físicas del núcleo

Propiedad	Valor estimado (NE → NI)
Aumento en densidad en la frontera NE-NI ($\Delta\rho$)	$700 \pm 200 \text{ kgm}^{-3}$
Capacidad calorífica (C_P)	$850 \pm 20 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Expansibilidad térmica (α)	$1.4 \pm 0.5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
Viscosidad cinemática (ν)	$1 \times 10^{-5 \pm 2} \text{ m}^2\text{s}^{-2} \rightarrow 1 \times 10^{10 \pm 3} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$
Difusividad térmica (K)	$5 \pm 3 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-2}$
Difusividad magnética (η)	$1.5 \pm 0.5 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$

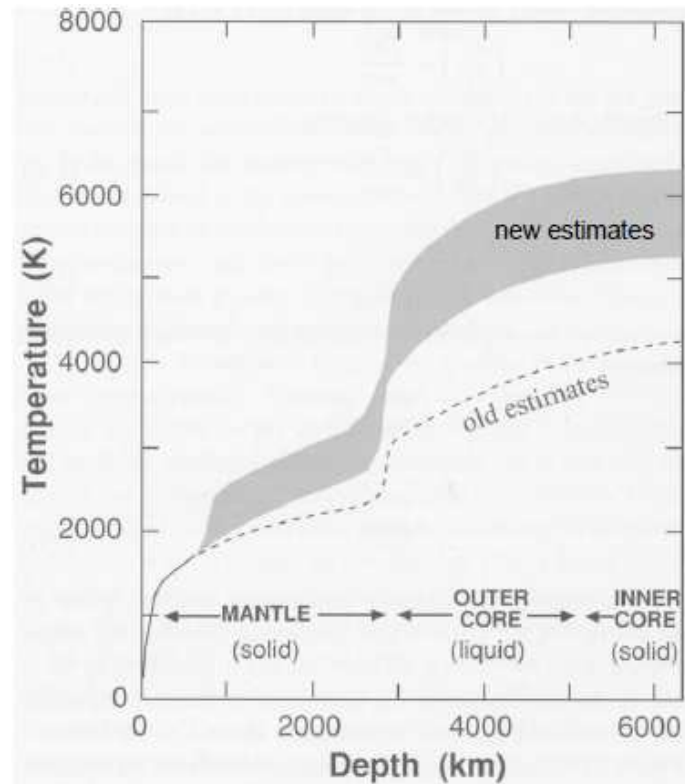
 Olson, P., (2007) *Overview of Core Dynamics. Treatise on Geophysics, 8.01, pp 1-30.*

2.6.1 La Tierra como una máquina térmica



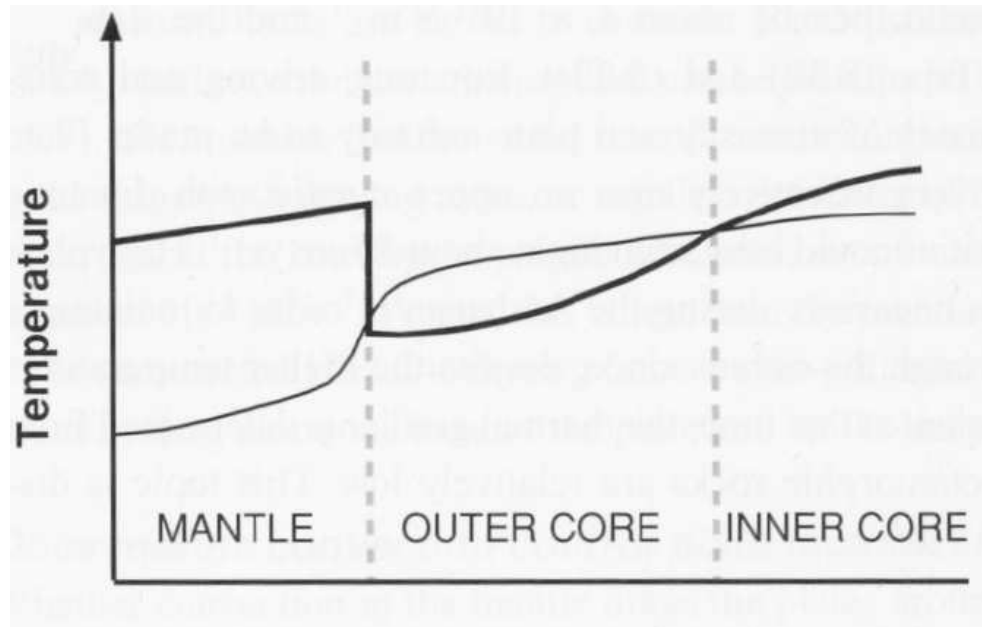
- La Tierra es un cuerpo de alta T, enfriándose.
- Eso es el origen de:
 - Los cambios de fase.
 - La convección del manto y la tectónica de placas.
 - Un campo de velocidades en el núcleo y el campo geomagnético.

2.6.2 El gradiente geotérmico de la Tierra



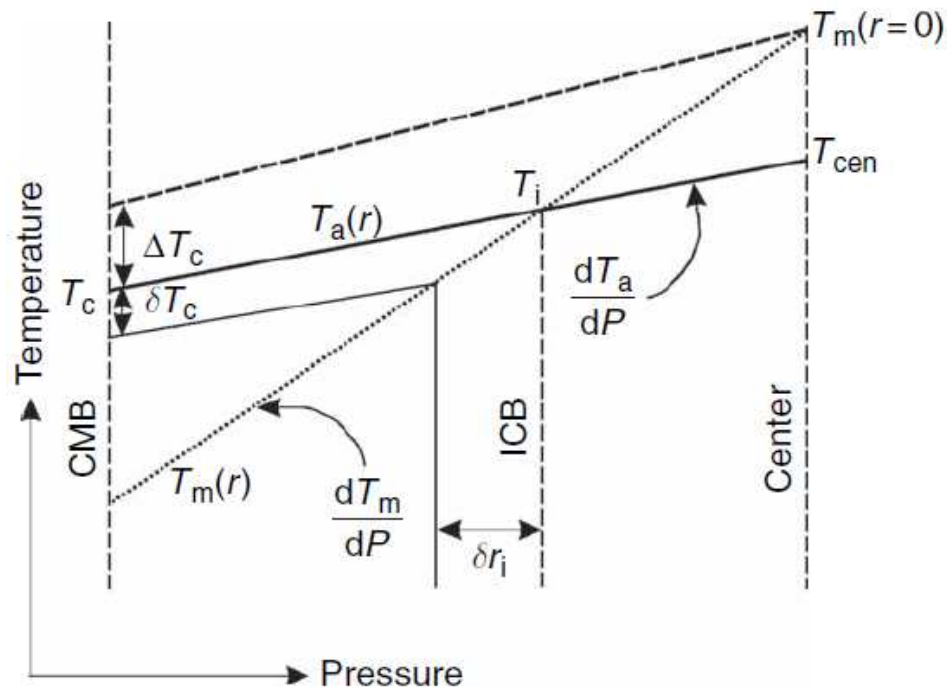
- El gradiente geotérmico representa el cambio en la temperatura con la profundidad dentro de la Tierra.
- Es difícil medir en el interior del planeta, hay que poner suposiciones sobre la composición y mineralogía.

2.6.3 El crecimiento del núcleo interno



- El gradiente geotérmico y la temperatura de fusión en la Tierra están mostrados en la figura (se supone la misma composición para el NI y el NE).
- Noten que el núcleo interno es sólido mientras que el núcleo externo es líquido.
- La Tierra se enfría y la línea geotérmica mueve en la dirección de menor temperatura. Entonces hay solidificación del núcleo interno.

2.6.3 El crecimiento del núcleo interno



- $T_a(r)$ es el perfil de la temperatura (adiabática) en el núcleo; $T_m(r)$ es la línea de fusión.
- Un enfriamiento en el borde núcleo-manto (CMB) por δT_c aumenta el radio del núcleo interno δr_i .
- (Más discusión en "Treatise in Geophysics", capítulo 8).

2.7.1 Fuentes de energía para la geodinamo

- La geodinamo es el mecanismo en que los movimientos en el núcleo generan el campo geomagnético.
- La energía para los movimientos en el núcleo podría venir de las posibles fuentes:
 1. El enfriamiento del planeta de su estado inicial.
 2. La congelación del núcleo externo al núcleo interno sólido provee calor latente y energía gravitacional con la liberación de elementos livianos.
 3. Elementos radiactivos (por ejemplo, potasio) podrían ser presentes en el núcleo.
 4. Las fuerzas de marea terrestre (de precesión). La influencia gravitacional de la Luna, y el Sol, que actúan en la Tierra causarían flujos en el núcleo. Posiblemente este efecto es débil.
- Por la conservación de energía, en el núcleo:

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \int \rho e dV}_{\text{cambio en energía interna}} \simeq \underbrace{- \oint P \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S}}_{\text{trabajo hecho por P}} - \underbrace{\oint \mathbf{q} \cdot d\mathbf{S}}_{\text{flujo de calor}} + \underbrace{\int \rho h dV}_{\text{radiactividad}} + \underbrace{\int \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \psi dV}_{\text{trabajo hecho por gravitación}}$$

2.7.2 La evolución térmica del núcleo

Las influencias sobre la evolución térmica del núcleo son:

- El flujo de calor en el borde núcleo-manto. Este varía en el tiempo y depende del manto, pero el hundimiento de placas tectónicas en el manto es poco entendido. El flujo de calor actual, estimado en ~ 9 TW, indica que el núcleo se enfría rápidamente y el núcleo interno podría tener un edad de $< 1 \times 10^9$ años; pero las observaciones de un campo geomagnético con un edad de $> 3.5 \times 10^9$ años contradice eso.
- La presencia de un núcleo interno que es creciendo, que efectivamente suministra energía de calor latente y de hundimiento gravitacional.
- La tasa de enfriamiento del núcleo, que depende en la presencia de elementos radiactivos (como K).
- La calefacción óhmica asociada con corrientes eléctricas en el núcleo.