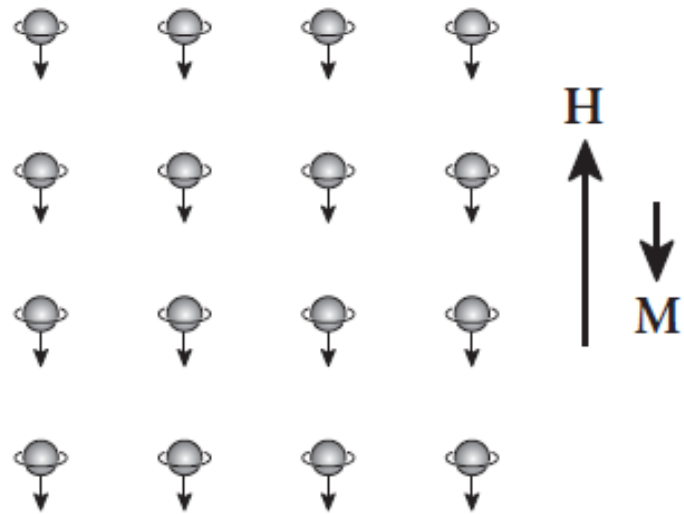


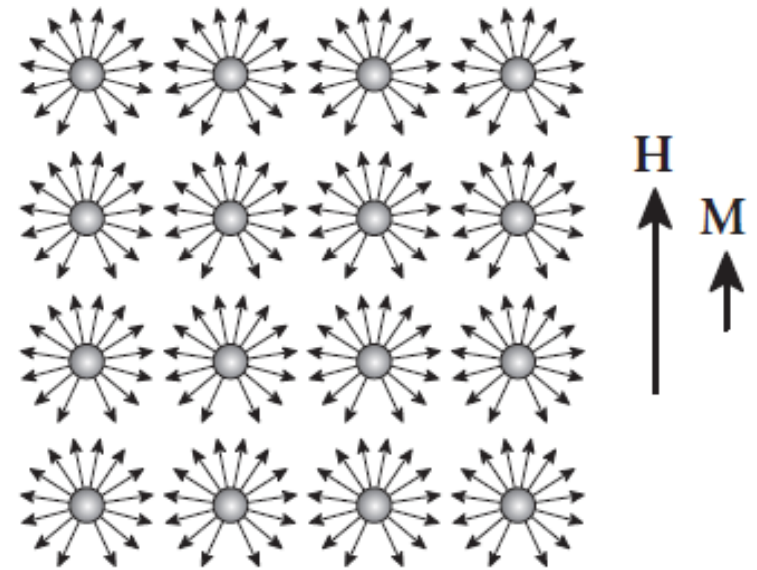
Magnetometría

- Dipolo magnético
- Materiales magnéticos naturales
- Campo magnético terrestre
- Remanencia magnética
- Técnicas de adquisición, procesamiento e interpretación

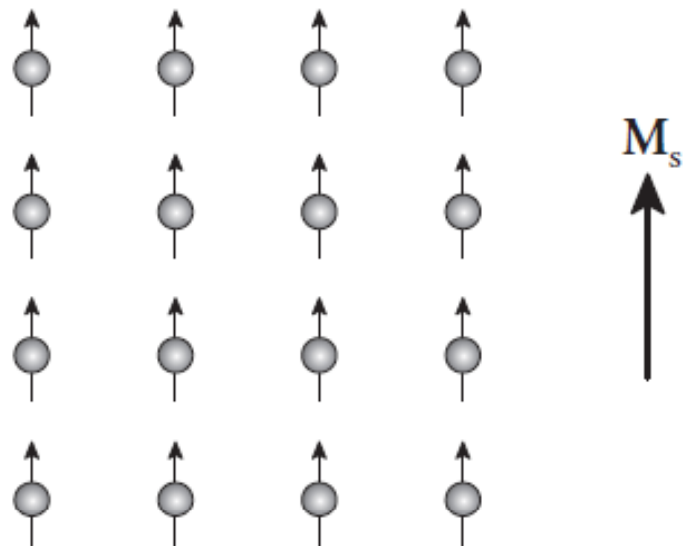
(a) diamagnetism



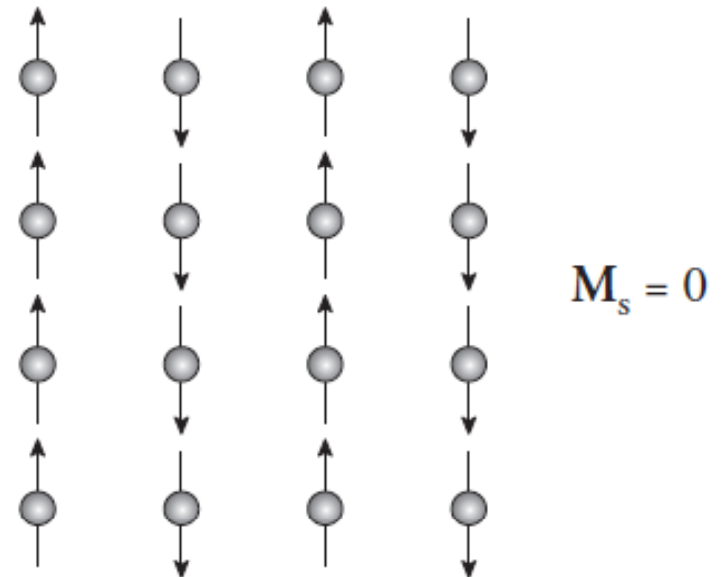
(b) paramagnetism



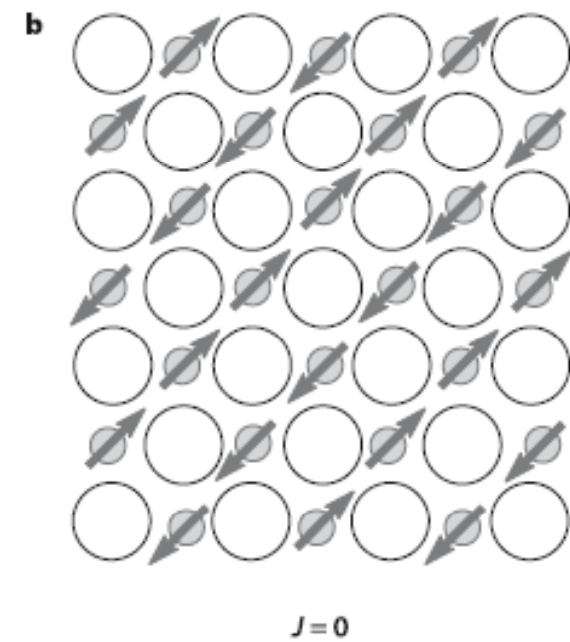
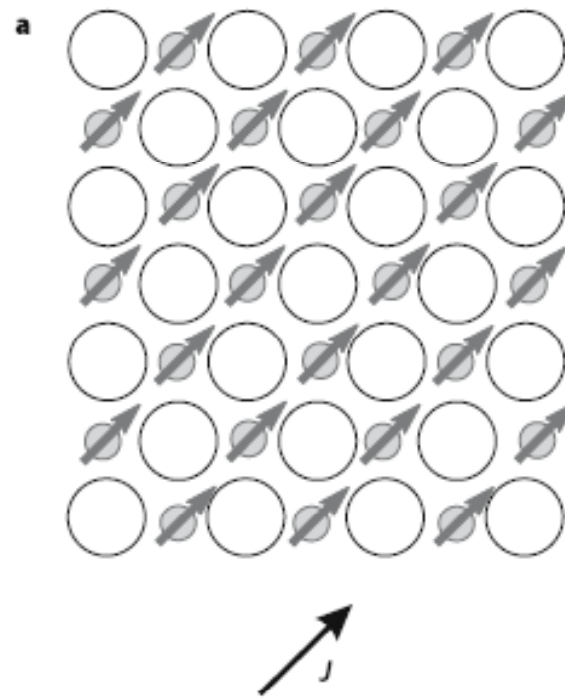
(c) ferromagnetism



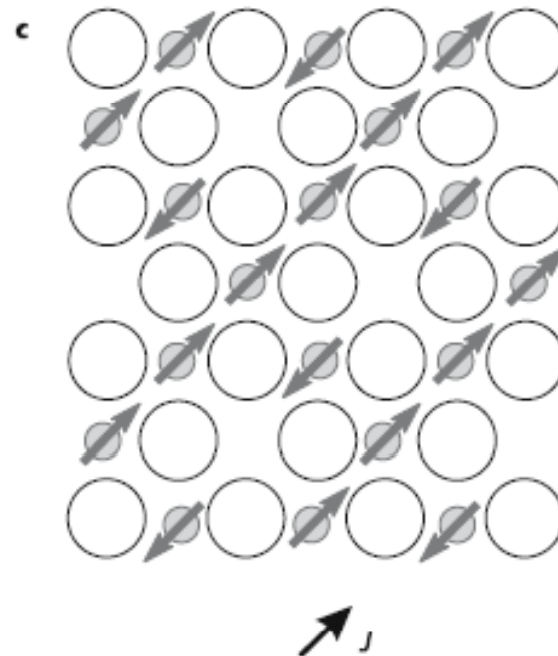
(d) antiferromagnetism



Estructuras cristalinas
que causan
ferromagnetismo
(i.e. acoplamiento de
los momentos
magnéticos atómicos)



c) magnetita,
intensidad de
magnetización fuerte



d) hematita, intensidad
de magnetización débil

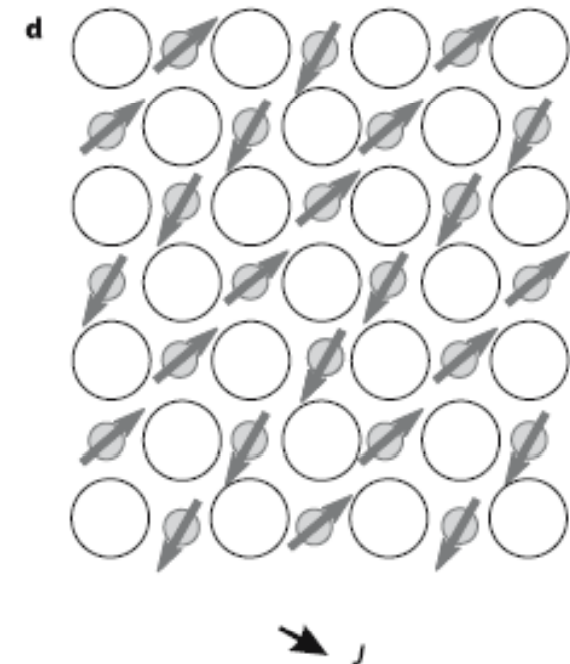
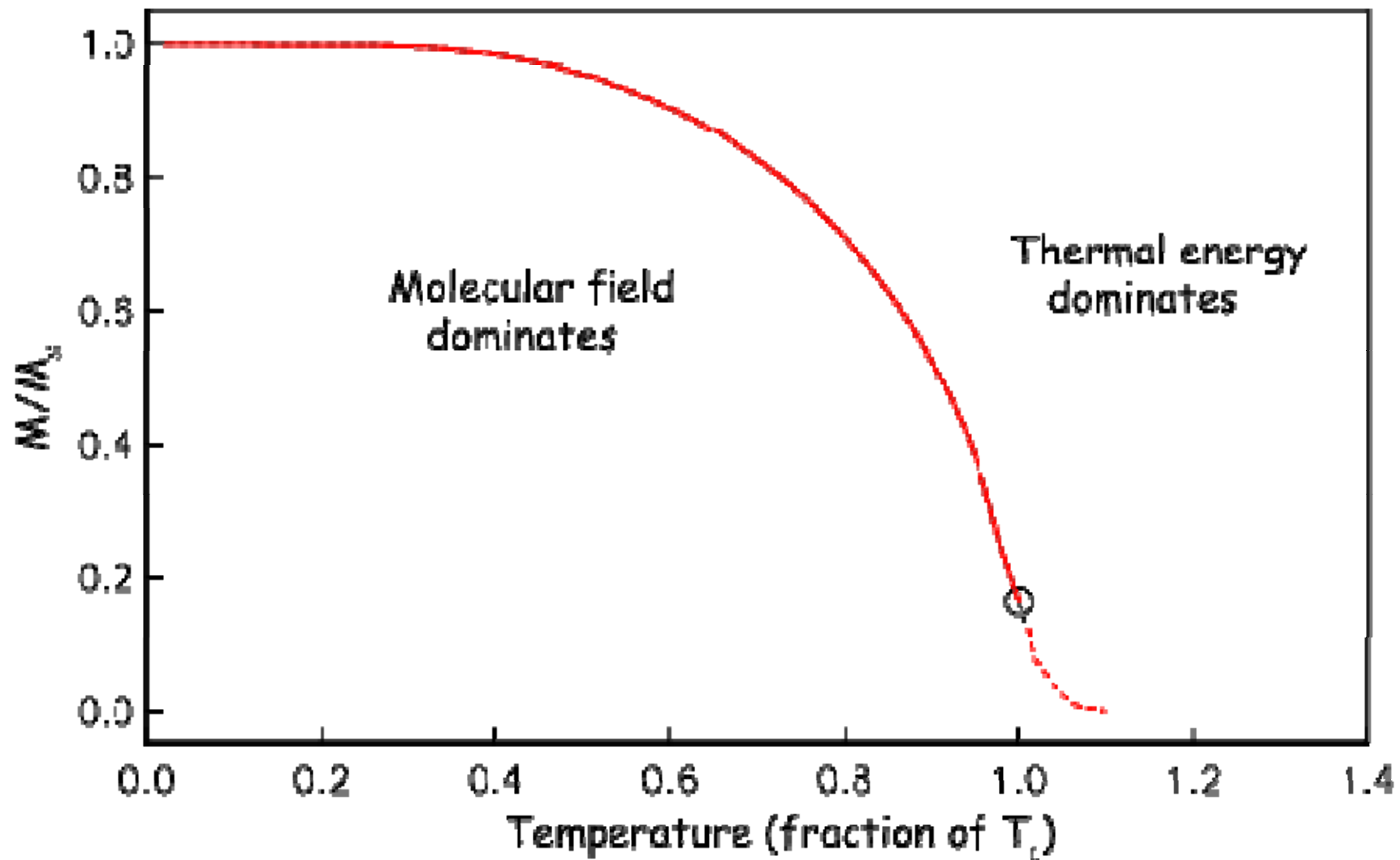
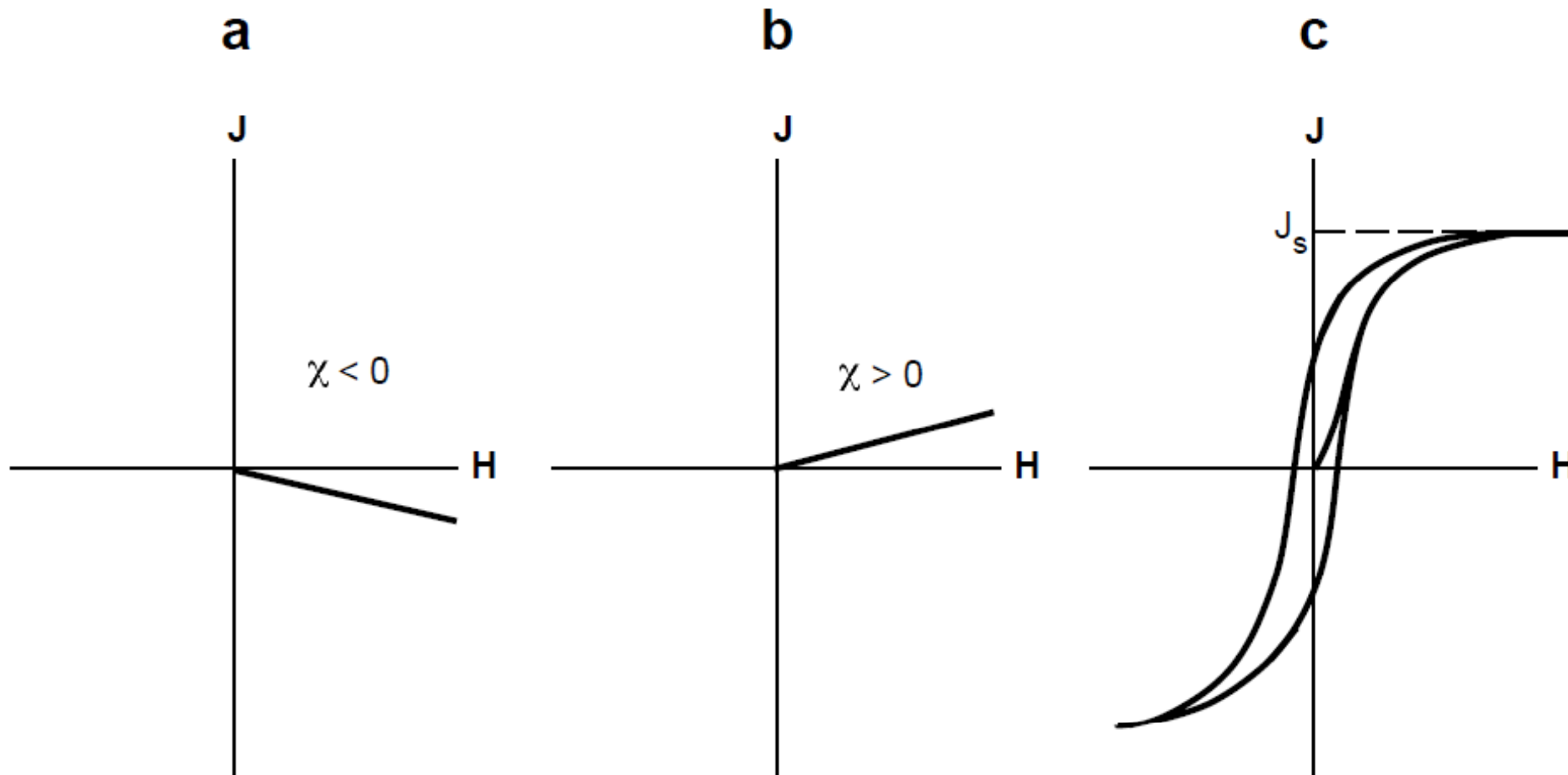


Fig. 2.6. Schematic picture of spin moment alignment in substances; **a** ferromagnetic s.s.; **b** antiferromagnetic; **c** ferrimagnetic; **d** canted antiferromagnetic (modified after O'Reilly 1984)



El aumento de la temperatura disminuye la posibilidad de interacción entre átomos vecinos y por lo tanto disminuye la magnetización espontánea.

El punto crítico en que la sustancia deja de ser ferromagnética se denomina ***temperatura de Curie***



Diamagnetismo

Paramagnetismo

Ferromagnetismo

$$\kappa = J/H$$

$$J = \kappa H$$

Histéresis

Magnetización espontánea de los minerales
ferromagnéticos:

Remanencia magnética y Paleomagnetismo

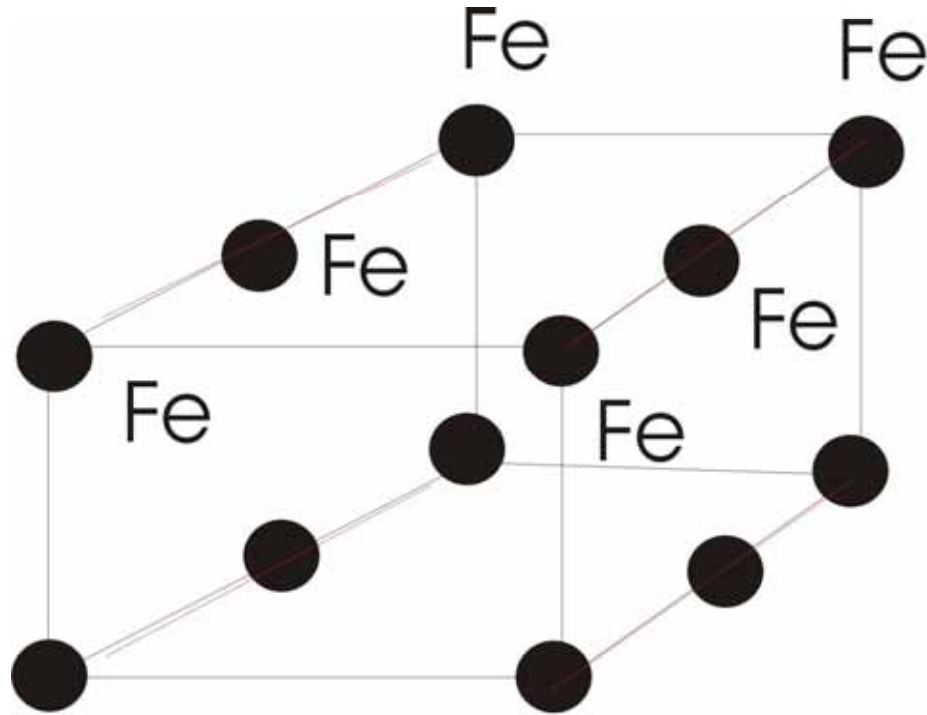
Balances energéticos en un material ferromagnético

- **Energía de Interacción:** Entre campo magnético externo y momentos magnéticos atómicos (*efecto ordenador*)
- **Energía de permuta:** Entre átomos vecinos por acoplamiento magnético de los electrones (*efecto ordenador*)
- **Energía térmica:** agitación térmica (*efecto desordenador*)

Anisotropía magnética: barreras entre estados de mínima energía local de las partículas

- **Estructura cristalina: anisotropía magnetocristalina**
- **Forma: anisotropía de forma**

Anisotropía Magnetocristalina



Mínima distancia
interatómica:
Máxima energía
de permuta



Dirección preferencial

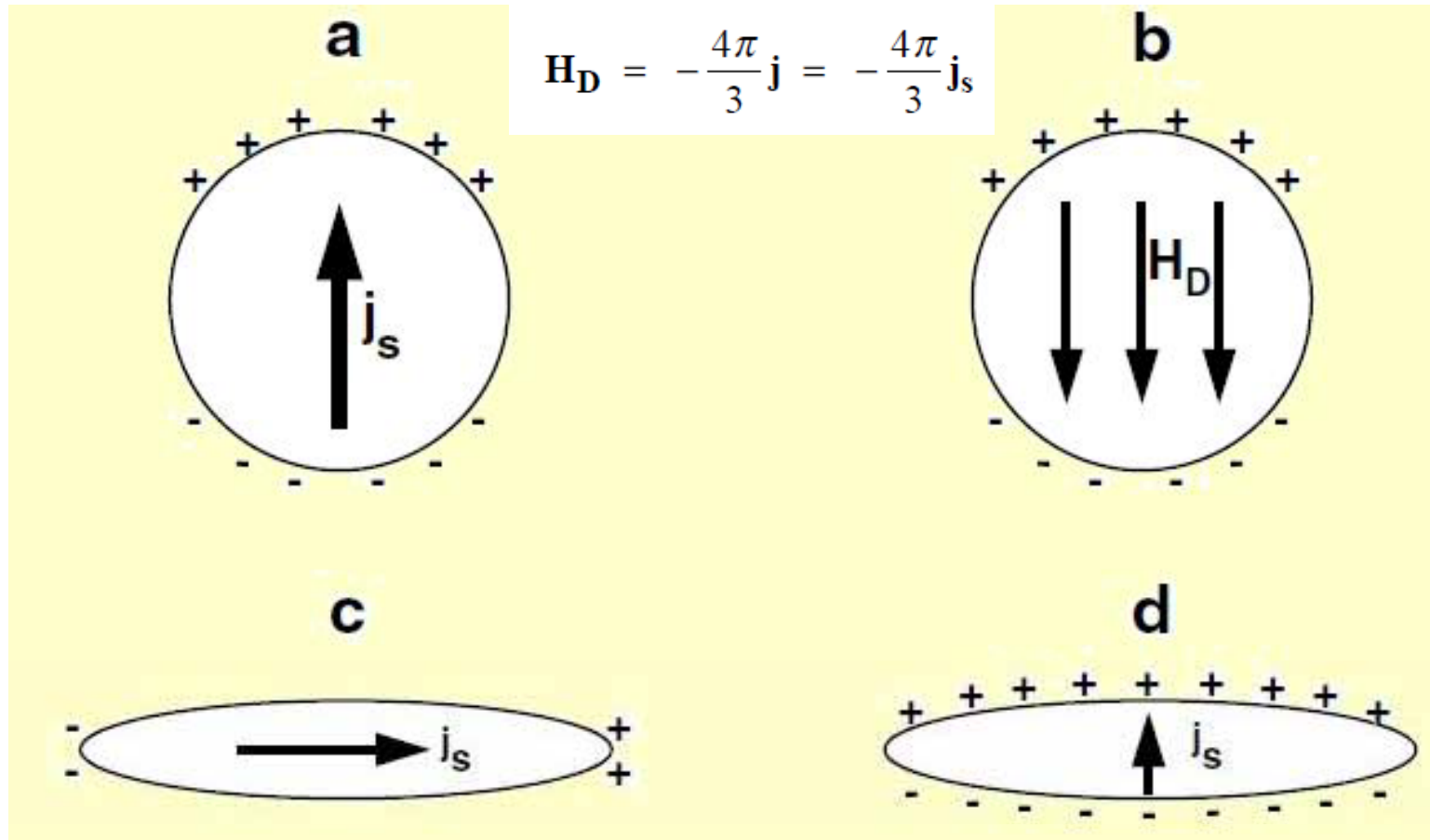


ANISOTROPÍA MAGNETOCRISTALINA

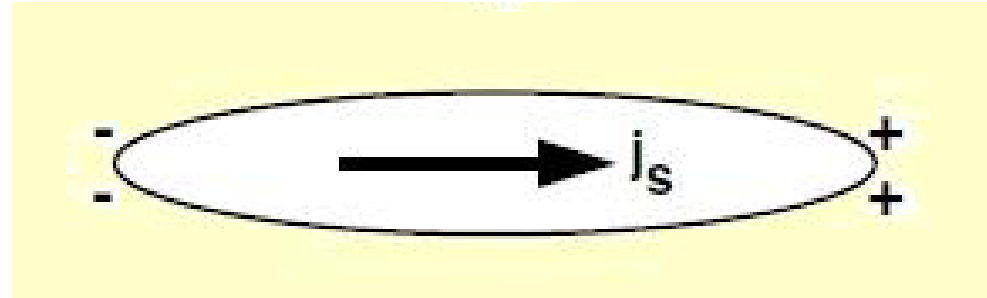
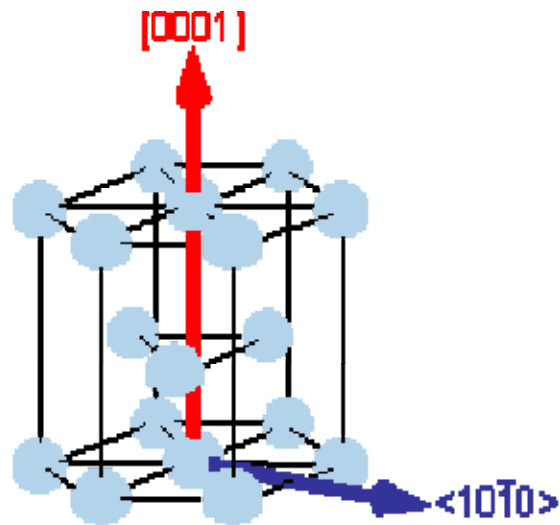
- **Hematita:** domina la anisotropia magnetocristalina

Anisotropía de forma

Campo desmagnetizante: $H_d = NJ$



El factor desmagnetizante N en cierta dirección, es proporcional al porcentaje de superficie cubierto por cargas magnéticas cuando se magnetiza en esa dirección. Esta diferencia en energía magnetoestática es una barrera a la rotación de J . El grano se va a magnetizar siempre en su eje mayor. En la magnetita domina la anisotropía de forma



Ya sea por anisotropía magnetocristalina o por anisotropía de forma, cada grano/cristal de material ferromagnético se magnetizará en su propia dirección fácil. No se produce inducción paralela al campo externo.

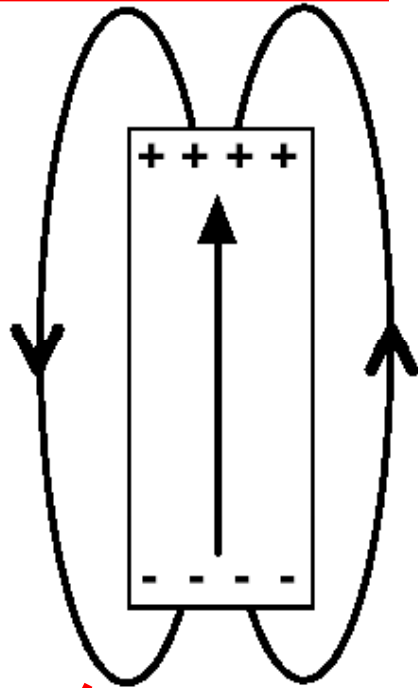
Cambiar la dirección/sentido de magnetización requiere aplicar campos magnéticos intensos, mucho más intensos que el terrestre. Llamamos al campo necesario para esto «*fuerza coercitiva*» del material.

Ahora veremos que la situación cambia si los granos/cristales tienen tamaño «muy grande» o «muy pequeño»:

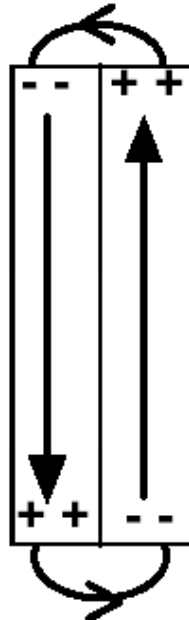
Material uniformemente magnetizado

Domain Formation

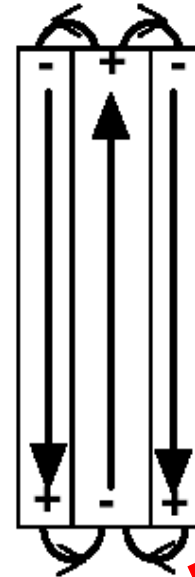
Material subdividido en «dominios»



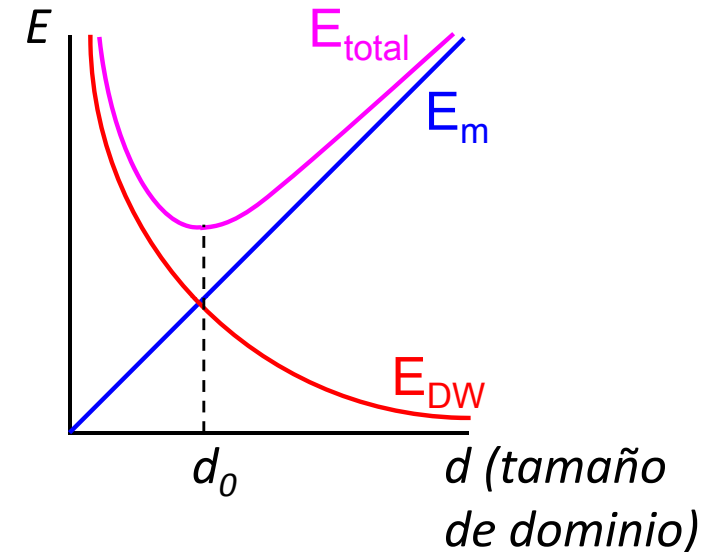
Single Domain



Multidomain



Total Energy = Magnetostatic Energy + Wall Energy



Este estado tiene energía acumulada por la repulsión entre cargas de distinto signo: energía magnetostática
La energía es proporcional a la magnetización

Las cargas opuestas están más cercanas dentro del grano. La magnetización total se reduce considerablemente.

Si el grano es suficientemente pequeño, la energía requerida para crear una pared de dominio es más grande que la energía magnetoestática.

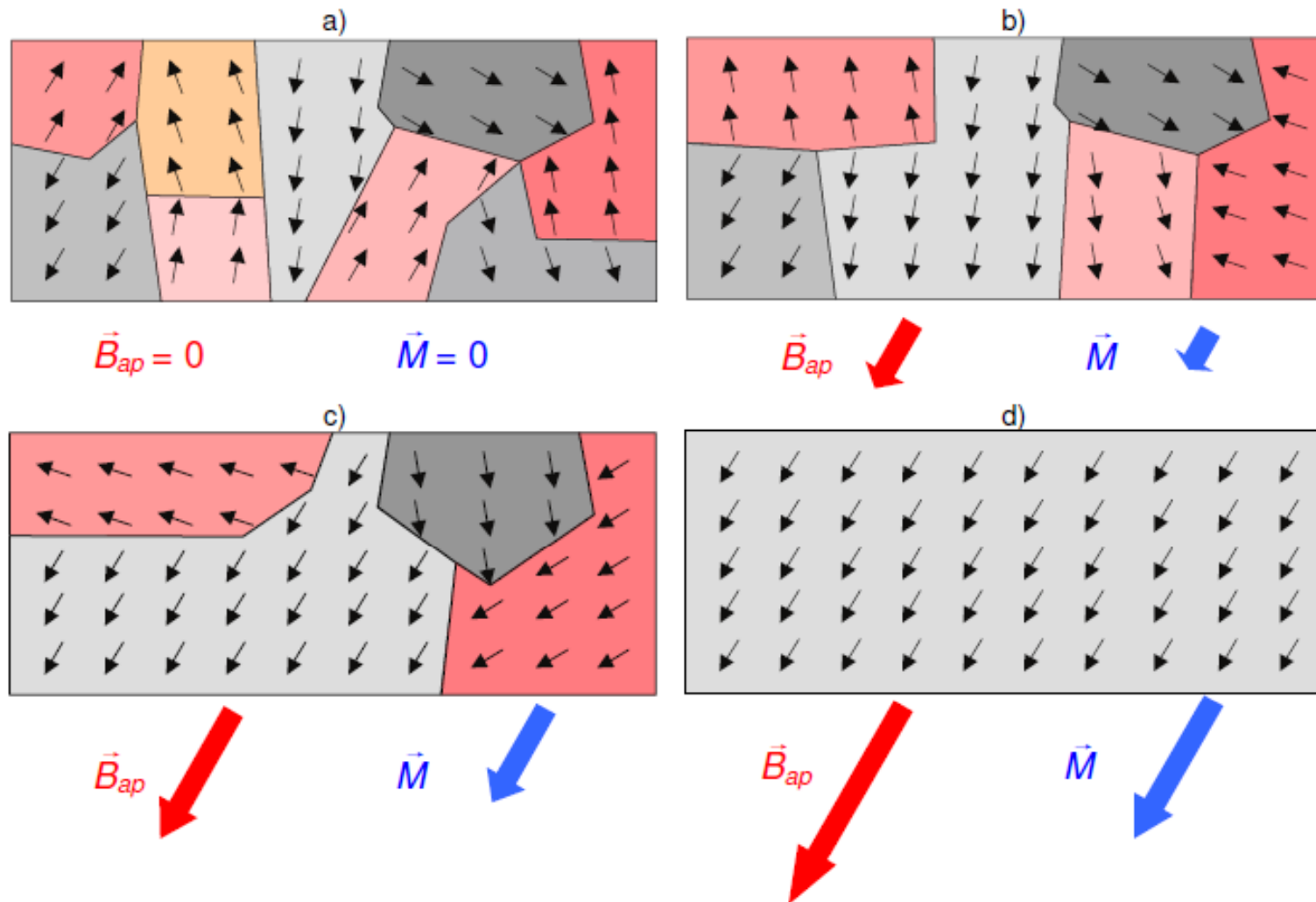
Entonces el grano no se subdivide: grano dominio simple, o single-domain (SD).

El diámetro crítico entre uno y otro comportamiento depende de la forma del grano y de la intensidad de magnetización.

Un mineral con magnetización débil como la hematita, se comporta como SD con tamaños hasta 15 μm .

Un mineral con magnetización fuerte como la magnetita, se comporta como SD con tamaños hasta 0,1 - 1 μm .

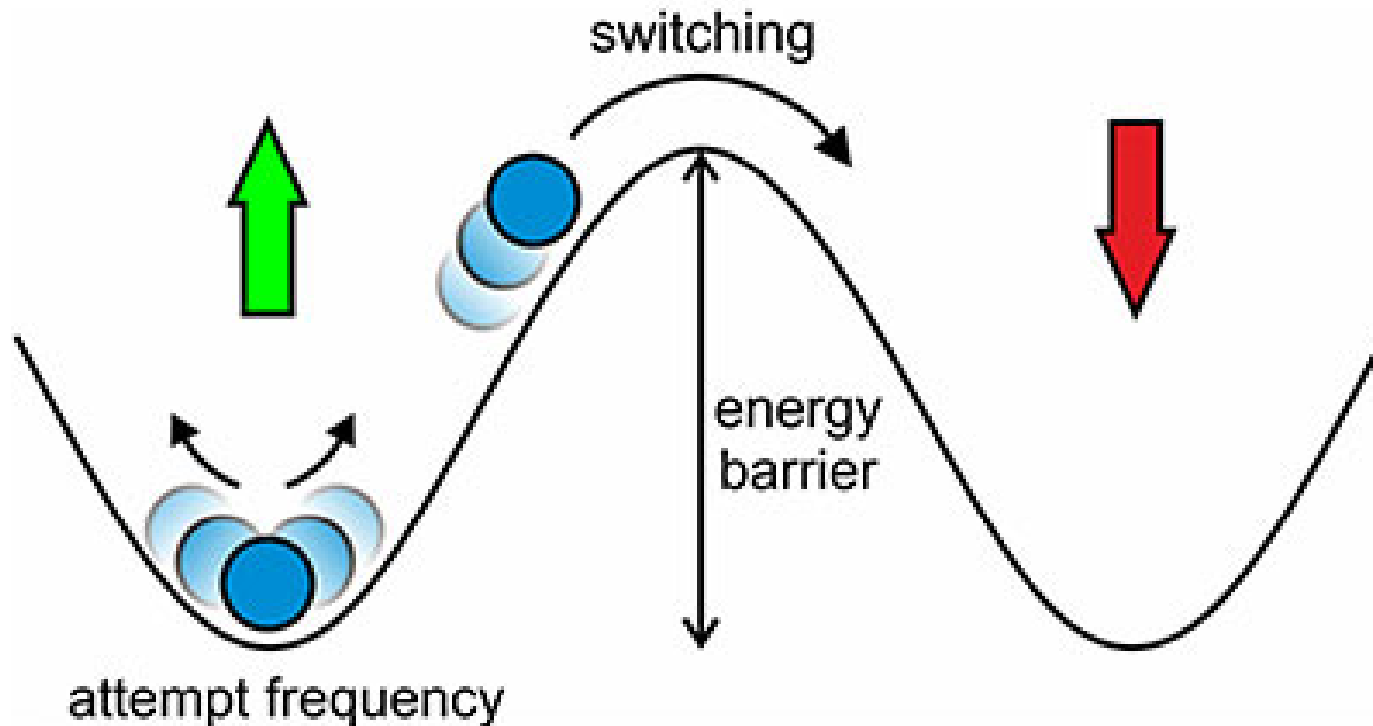
(Límites aproximados, dependencia de la forma)

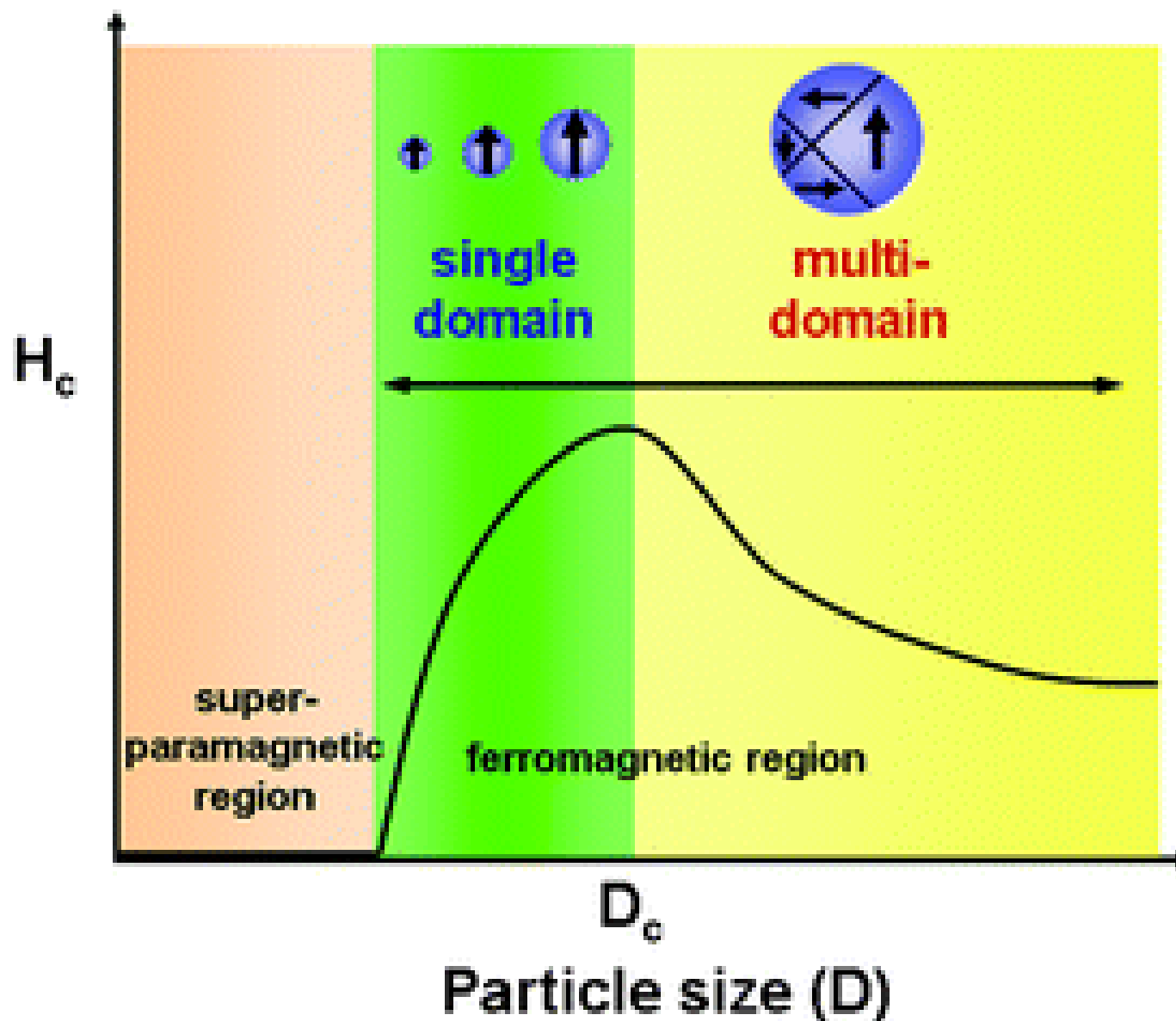


En presencia de campo externo, las paredes de dominio se desplazan de modo que los dominios orientados favorablemente aumentan de tamaño. Por lo tanto, el material adquiere una magnetización neta paralela al campo aplicado.

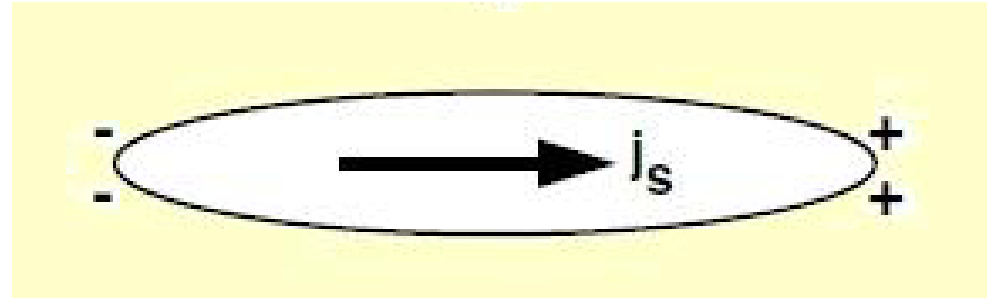
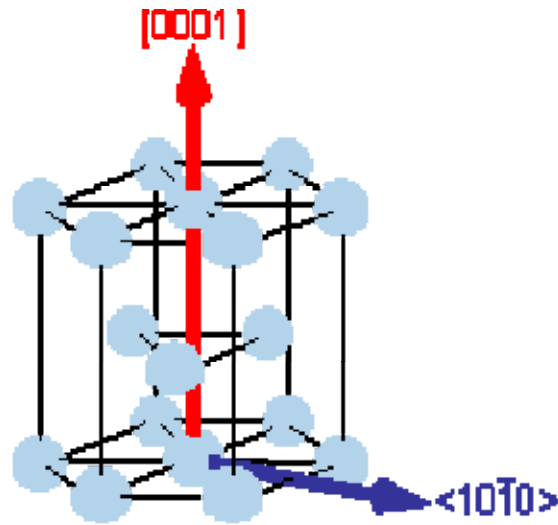
Superparamagnetismo

La barrera energética entre dos direcciones posibles de magnetización (energía anisotrópica) depende del volumen. Si el volumen es demasiado pequeño, la barrera se vuelve demasiado débil y el grano cambia espontáneamente su dirección de magnetización.





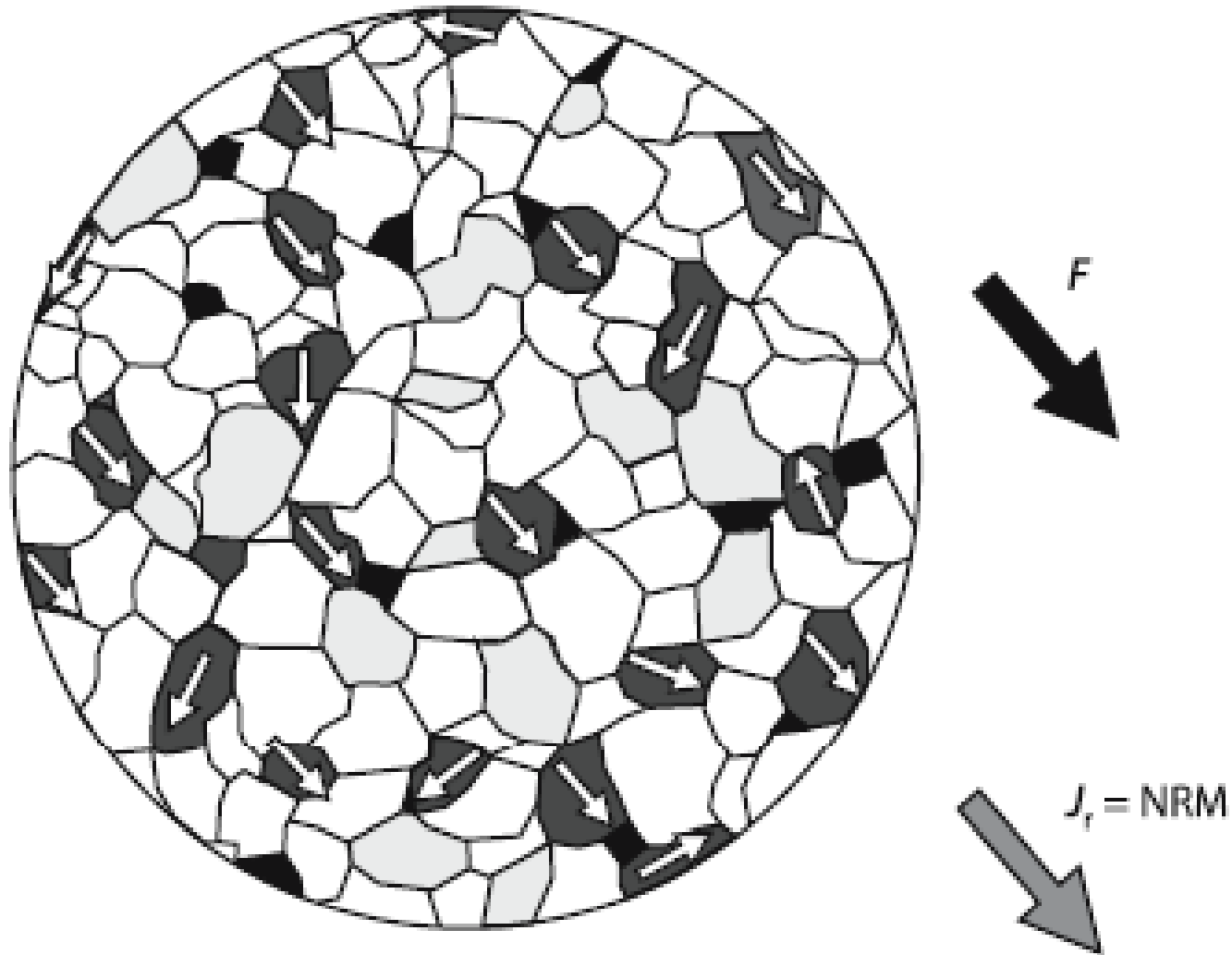
Sólo las partículas cuyo tamaño esté en el rango de «dominio simple» tienen una fuerza coercitiva suficientemente grande como para que su magnetización no se vuelva paralela a la del campo terrestre, todo el tiempo



Ya sea por anisotropía magnetocristalina o por anisotropía de forma, cada grano/cristal de material ferromagnético DOMINIO SIMPLE se magnetizará en su propia dirección fácil. No se produce inducción paralela al campo externo.

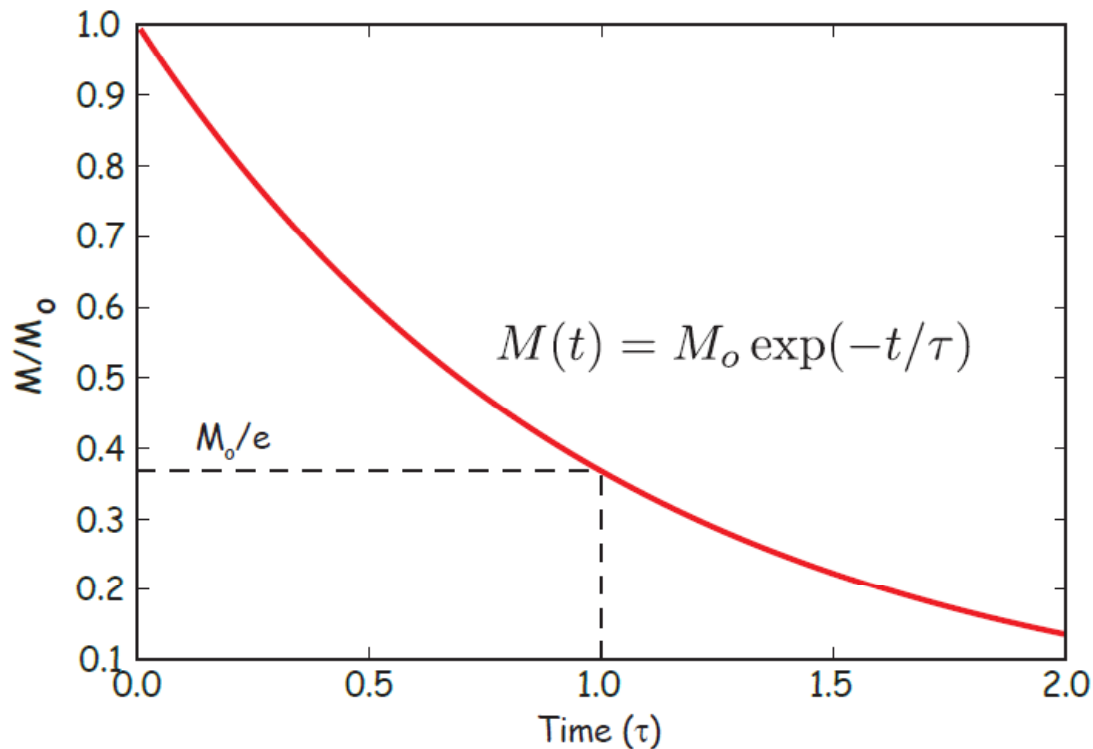
De todas sus orientaciones fáciles posibles, el grano se magnetizará en aquella que sea más cercana al campo presente en el momento en que se forma.

Cambiar la dirección/sentido de magnetización requiere aplicar campos magnéticos intensos, mucho más intensos que el terrestre.



Los granos ferromagnéticos de la roca adquieren su magnetización espontánea a lo largo de la dirección fácil más cercana a la dirección del CMT. La resultante es el **magnetismo remanente natural (MRN)**.

Relajación magnética



Decaimiento de la remanencia en
ausencia de campo

τ : tiempo de relajación

Consideremos un conjunto de partículas uniaxiales alineadas, magnetizadas en la dirección del eje fácil.

Una vez removido el campo, la fluctuación térmica puede hacer que la dirección de cada partícula experimente una especie de rotación browniana en contra de la barrera energética anisotrópica.

Para todo material magnetizado existe un tiempo en el cual la magnetización remanente se habrá reducido exponencialmente

Energía térmica

Provoca agitación térmica en la estructura cristalina.

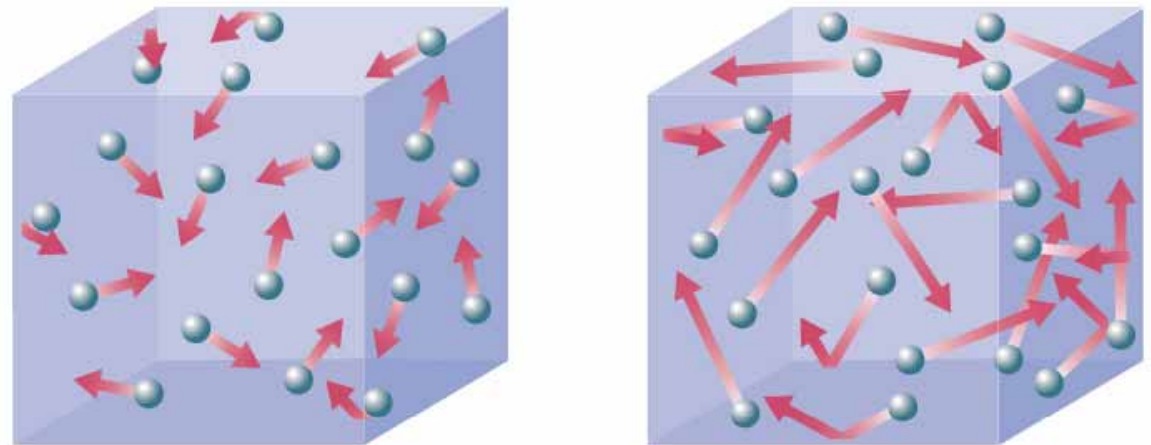
Agitación térmica: Movimiento aleatorio de átomos y moléculas en cualquier objeto que está a temperaturas por encima de cero absoluto

Debido a la energía térmica, las direcciones de los momentos magnéticos oscilan rápida y aleatoriamente

$$E = k T$$

Donde T = temperatura en grados Kelvin

k = constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)



Longer arrows mean higher average speed.

Relajación magnética

El tiempo de relajación depende de la altura de la barrera energética, la cantidad de energía térmica, y del mecanismo por el cual la energía térmica se transforma en energía rotacional.

Néel (1949) demostró que el mecanismo es la deformación elástica de la partícula debido a la agitación térmica

$$\tau = \frac{1}{C} \exp \frac{[\text{anisotropy energy}]}{[\text{thermal energy}]} = \frac{1}{C} \exp \frac{[Kv]}{[kT]}$$

$$h_c = 2K / j_s$$

$$\tau = \frac{1}{C} \exp \left(\frac{v h_c j_s}{2kT} \right)$$

Ecuación de Néel

Ecuación de Néel

$$h_c = 2K / j_s \qquad \tau = \frac{1}{C} \exp\left(\frac{v h_c j_s}{2kT}\right)$$

C: «factor de frecuencia», aprox. 10^{-10} por seg

v: volumen de la partícula

h_c : fuerza coercitiva

j_s : magnetización de saturación

k: constante de Boltzmann

T: temperatura absoluta

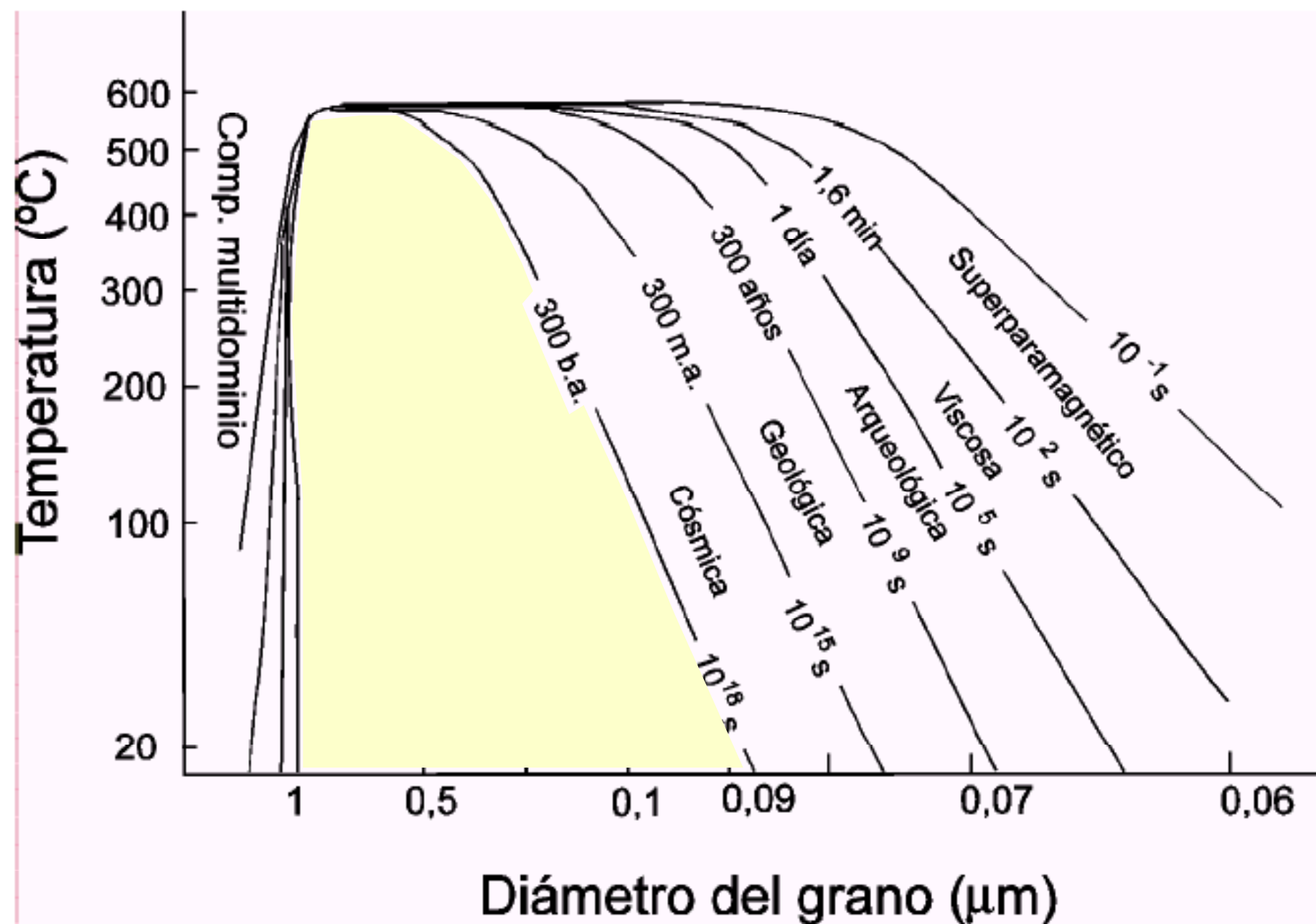


Figura 3: Relación entre temperatura, tamaño de partículas y tiempo de relajación de la magnetización remanente (ilustrado en las curvas) para granos de titanomagnetita (de Tarling, 1983).

¿Cómo preservar la dirección del campo magnético antiguo?

Ya sabemos cómo pudieron preservar las rocas, una dirección antigua del campo magnético: por el largo tiempo de relajación de las partículas ferromagnéticas SD, debido a su anisotropía.

Pero, ¿cómo se magnetizaron? ¿Cómo pudo un campo débil como el terrestre, imprimirles alguna vez su dirección?

Respuesta: la magnetización fue adquirida cuando el sistema no tenía las mismas condiciones físicas que las actuales. Hace falta un escenario de tiempo de relajación suficientemente corto como para que la magnetización se adecúe al campo externo, y un aumento subsiguiente de τ que «bloquee» el sistema.

$$\tau = \frac{1}{C} \exp\left(\frac{v h_c j_s}{2kT}\right)$$

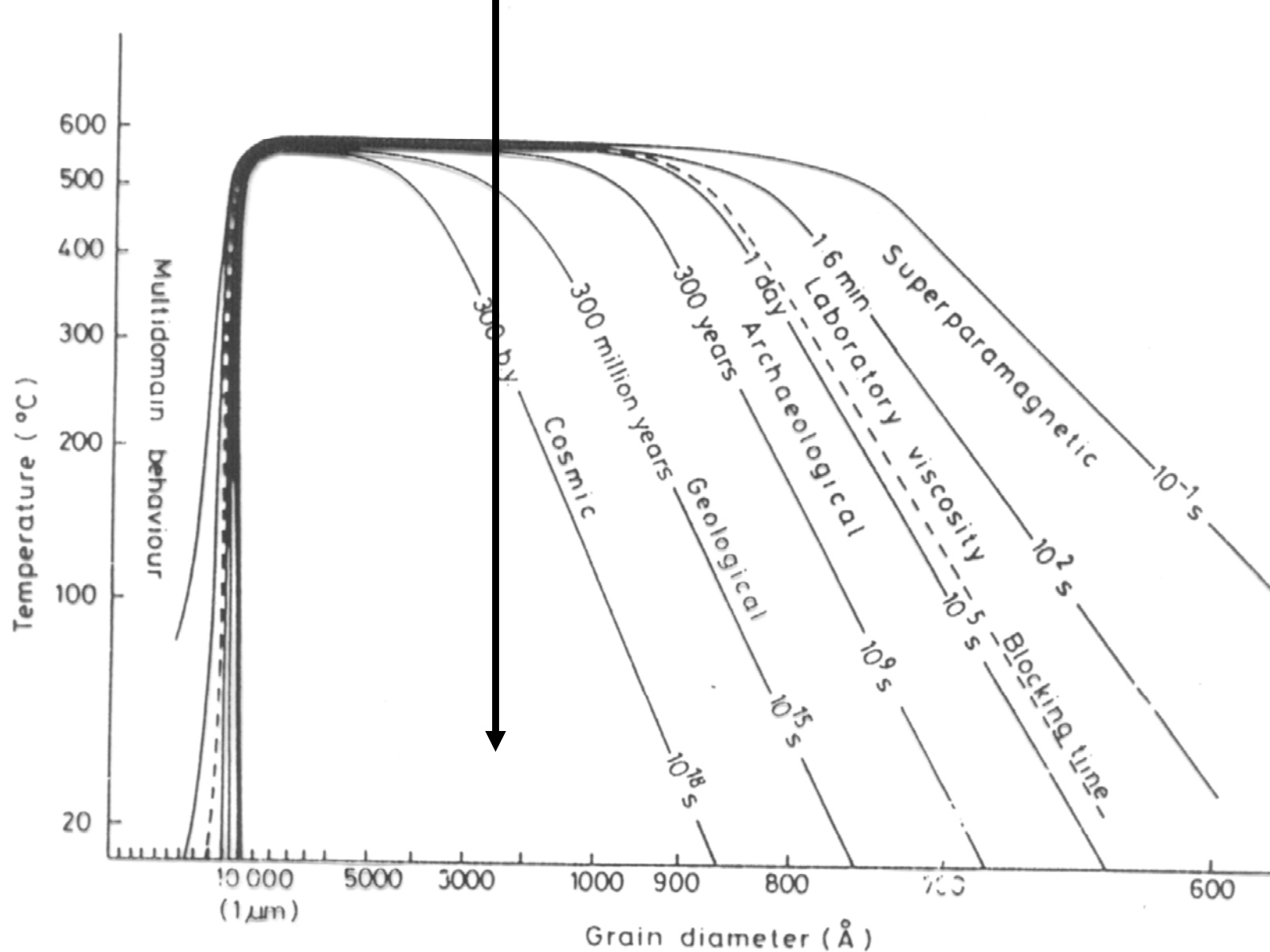
La adquisición de remanencia requiere bajar y luego subir el tiempo de relajación, para que los minerales magnéticos alcancen una magnetización de equilibrio, y luego bloquearla

El tiempo de relajación se modifica cambiando la temperatura o el volumen.

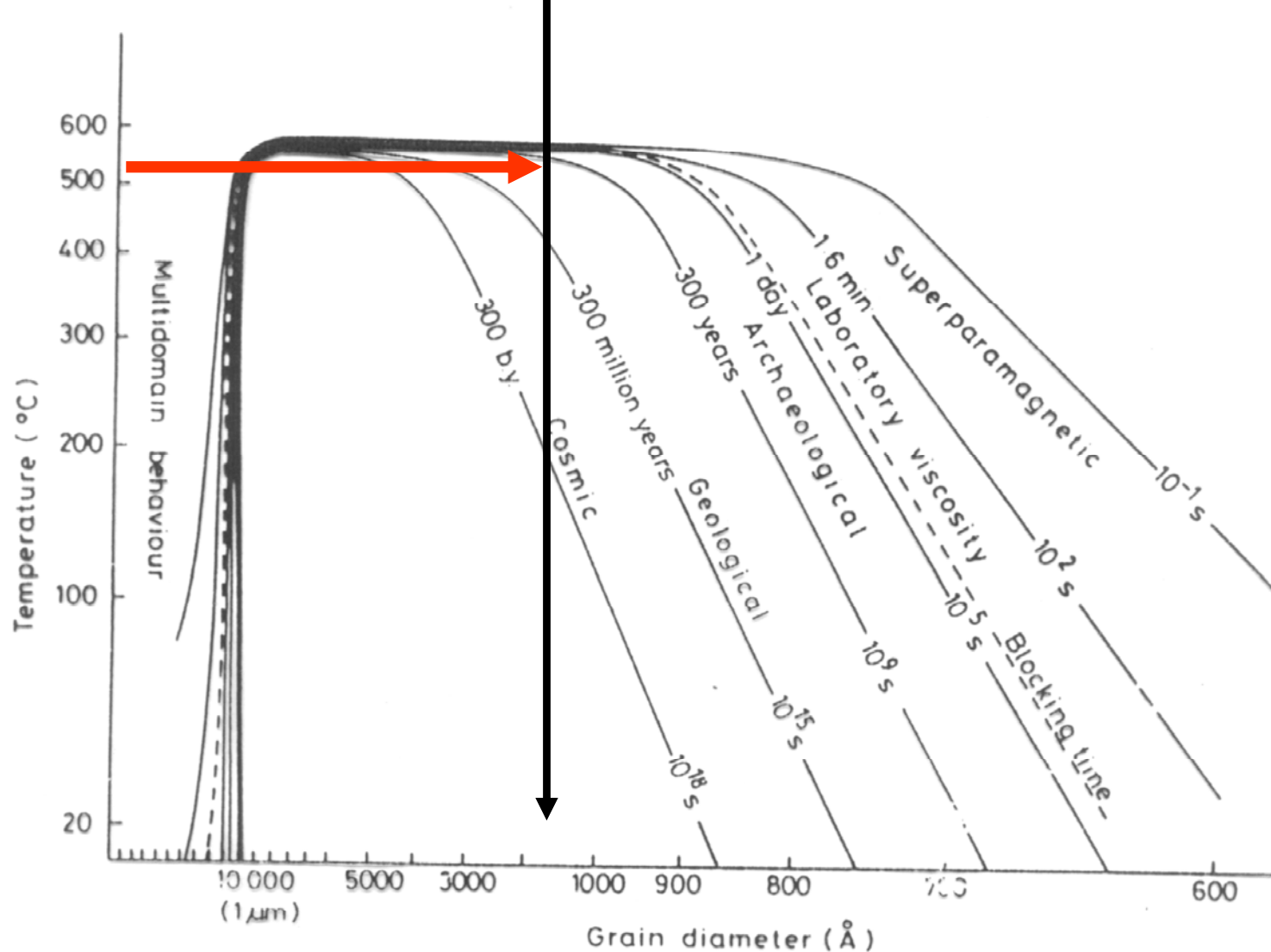
$$\tau = \frac{1}{C} \exp\left(\frac{v h_c j_s}{2kT}\right)$$

Origen del MRN (NRM)

- **Ferromagnetismo de las partículas**
Anisotropía, dominios magnéticos, histéresis, tiempo de relajación, superparamagnetismo
- **Algunos tipos de MRN (en la roca)**
TRM: magnetización termoremanente
CRM: magnetización remanente química
DRM: magnetización remanente deposicional

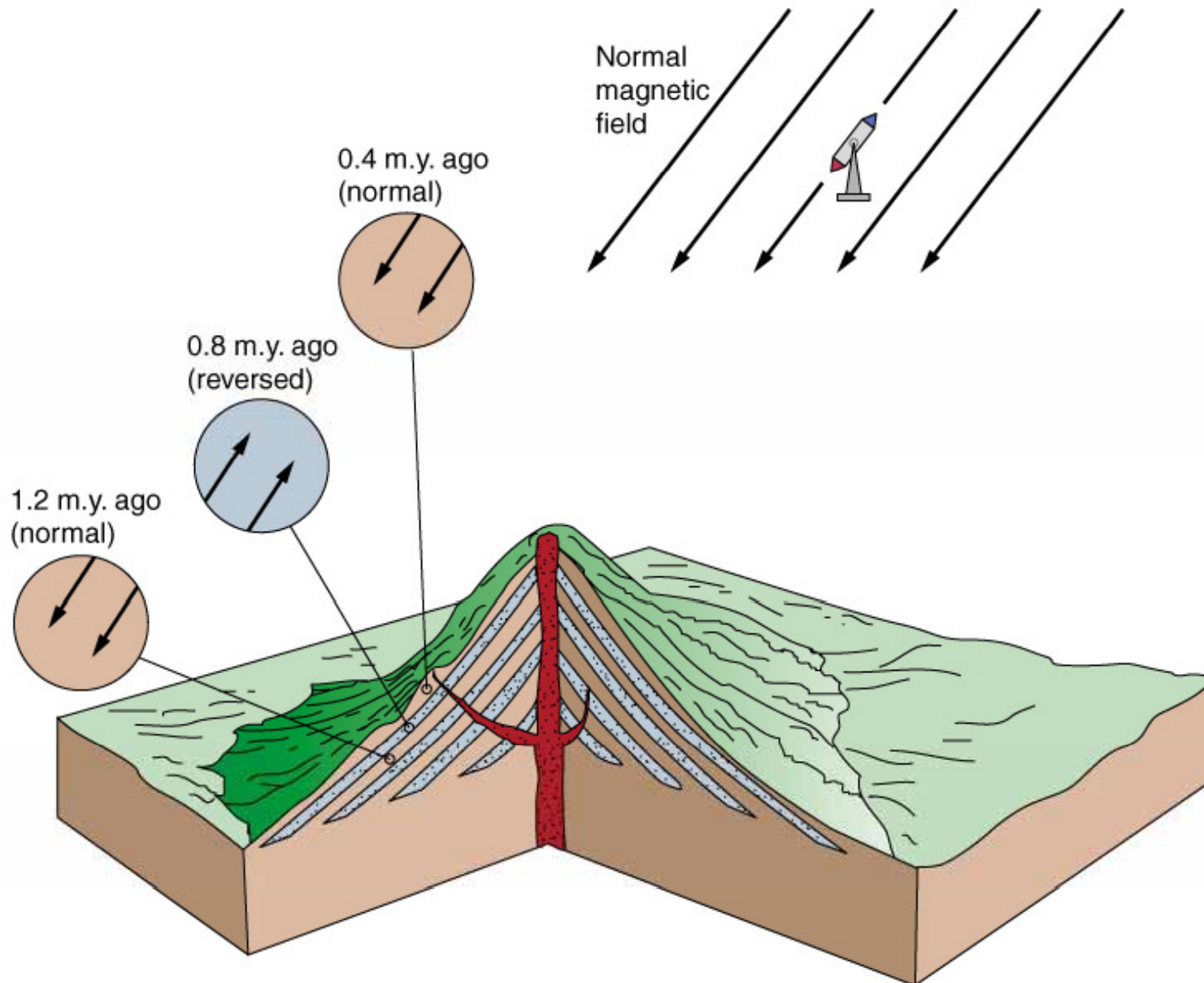


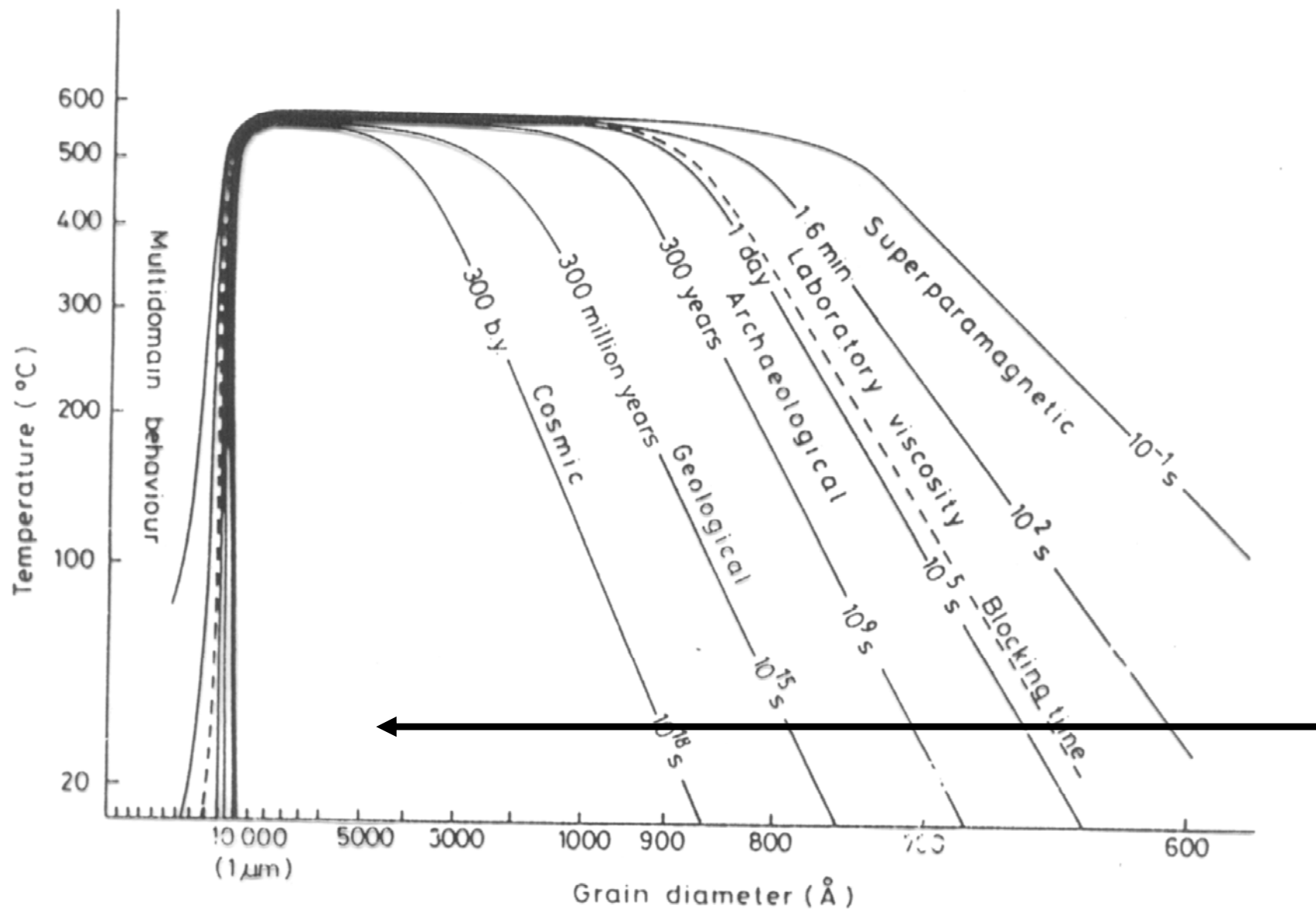
Líneas de igual **T** en un gráfico T vs V según ecuación de Néel para magnetitas esféricas



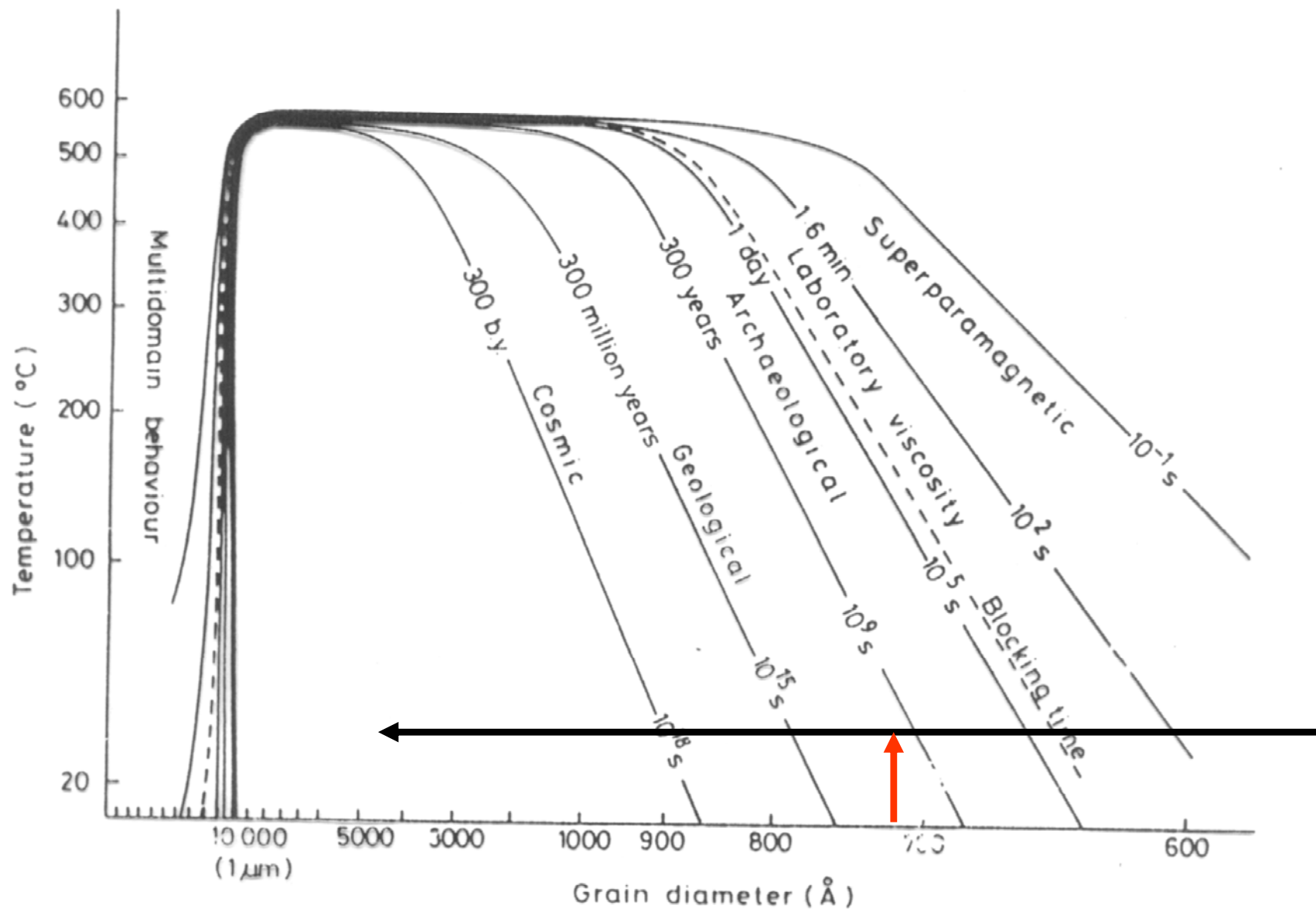
Temperatura de Bloqueo: Temperatura a la cual la magnetización espontánea alcanza tiempos de relajación suficientemente grandes. Magnetización Espontánea pasa a ser **Magnetización Remanente**

Magnetización termoremanente (TRM)





Líneas de igual **T** en un gráfico T vs V según ecuación de Neel para magnetitas esféricas



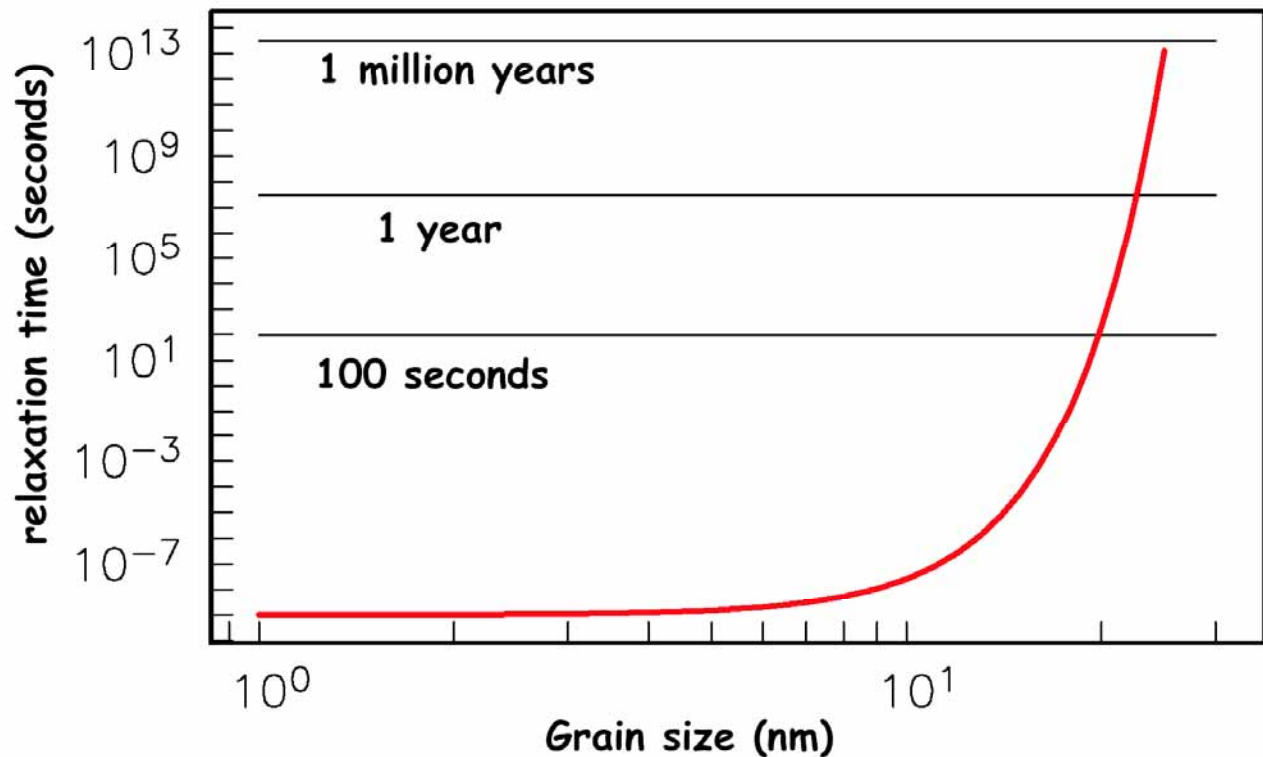
Volumen de Bloqueo: volumen al cual la Magnetización Espontánea pasa a ser **Remanente**

Magnetización remanente química (CRM)

Se produce por cambios químicos que forman minerales ferromagnéticos por debajo de sus temperaturas de bloqueo, en presencia de un campo magnético. Esto incluye a) alteración de minerales preexistentes y b) precipitación a partir de una solución.

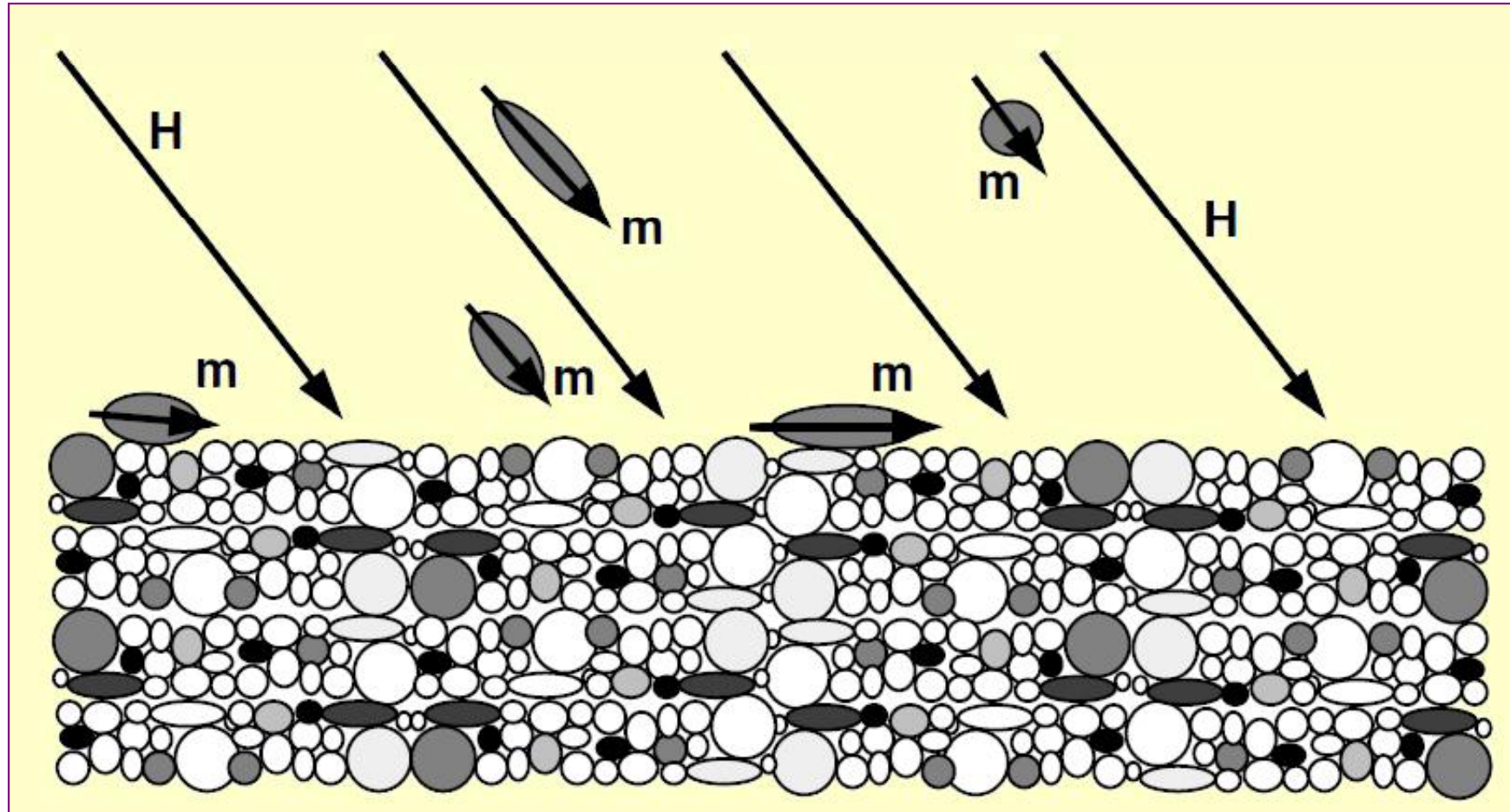
El incremento exponencial del tiempo de relajación con el aumento del volumen, produce el bloqueo de la remanencia.

Dependiendo del momento geológico en que se produce el cambio químico, la CRM será una magnetización primaria o secundaria.



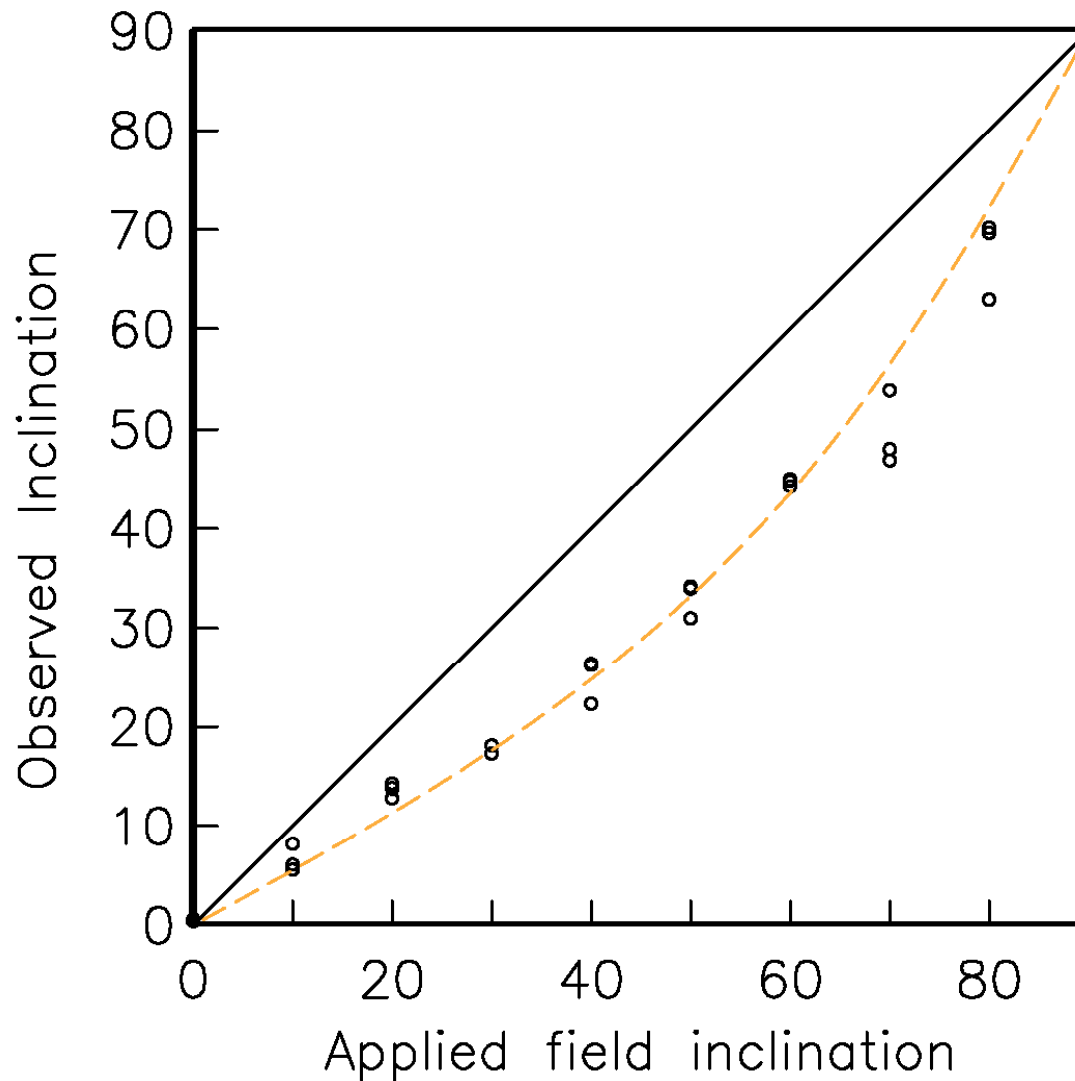
para 300 K

Magnetización remanente depositacional (DRM)



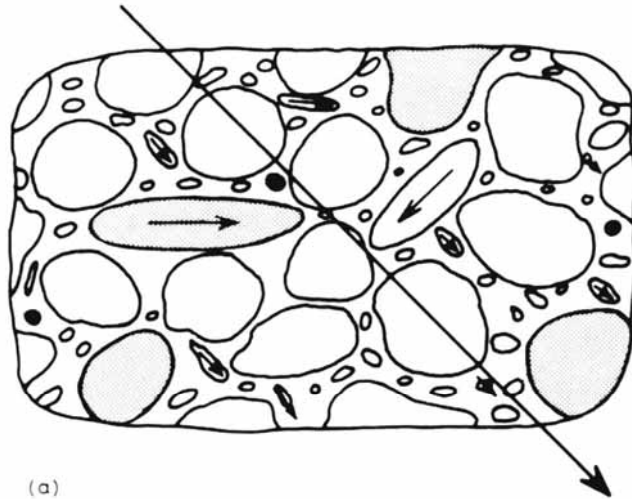
También llamada detrítica (Butler la describe como «detrítica depositacional»). Las partículas en depositación, se orientan con respecto al campo magnético terrestre

Error de inclinación en DRM

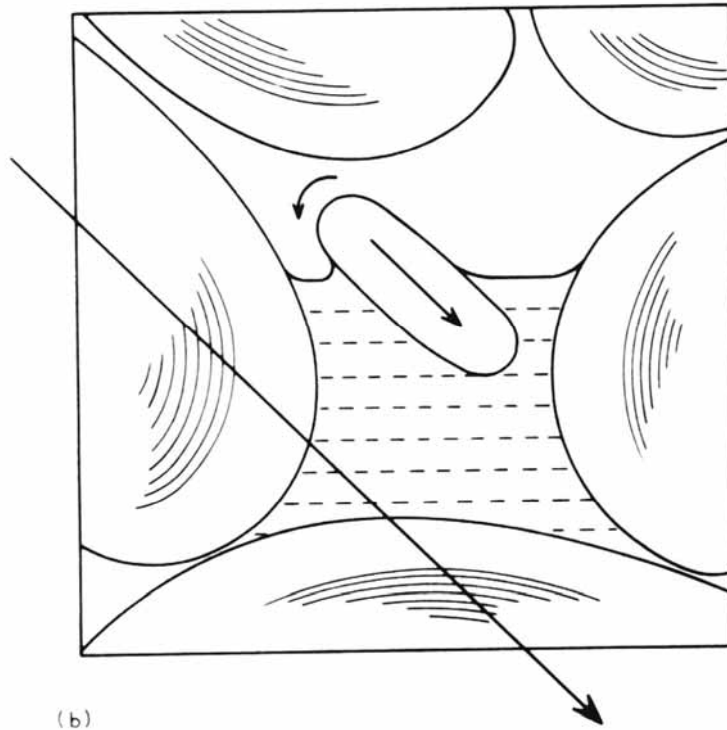


Experimentos de re-depositación muy lenta (varias semanas a meses) demuestran que este error disminuye con el tiempo, mitigado por la reorientación post-depositacional de las nanopartículas magnéticas

Magnetización remanente detrítica (post-depositacional)



- Partículas magnéticas pequeñas tienden a orientarse por acción de H con suficiente espacio poral



TRM: El material se enfría desde temperaturas superiores a su temperatura de Curie, en presencia de campo magnético.

CRM: Los granos magnéticos crecen a temperatura constante en presencia de campo magnético.

DRM: Los granos magnéticos se depositan en un medio acuoso en presencia de campo magnético.

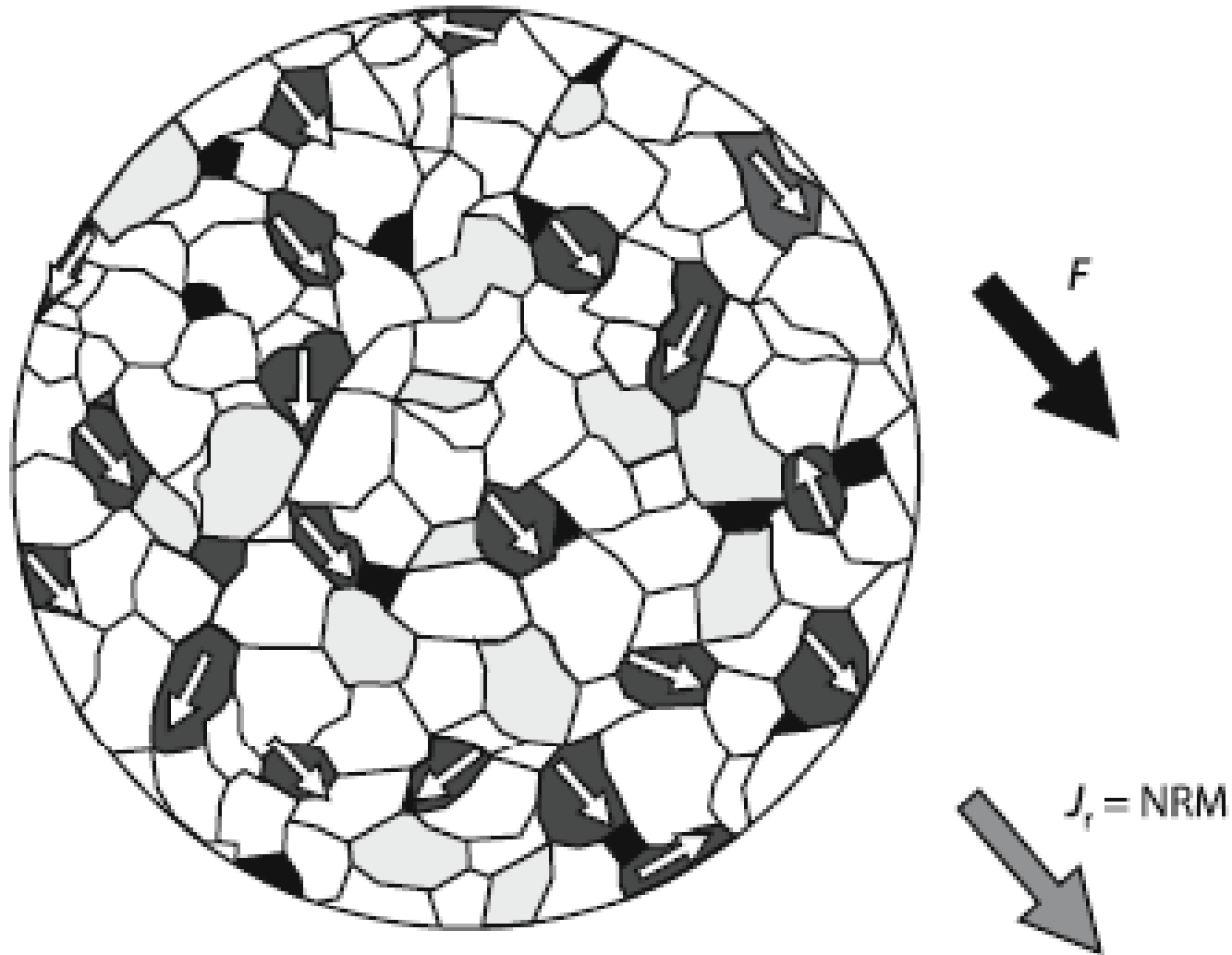
Magnetización remanente natural (MRN)

$$J = J_{\text{inducida}} + J_{\text{remanente}}$$

$$\text{MRN} = \text{MRN primaria} + \text{MRN secundaria}$$

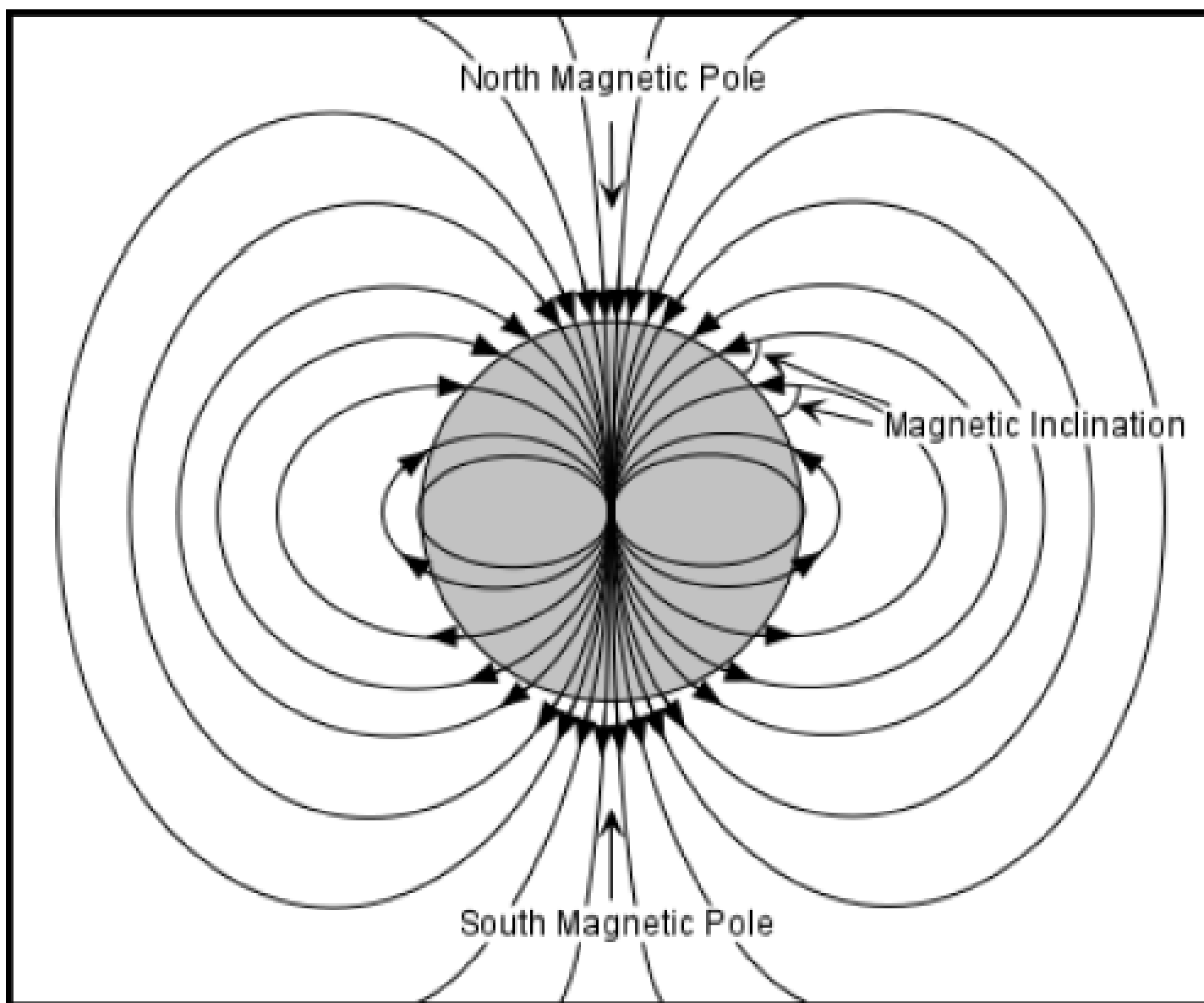
Útil para
paleomagnetismo,
información sobre el
campo magnético en un
tiempo geológico
determinado

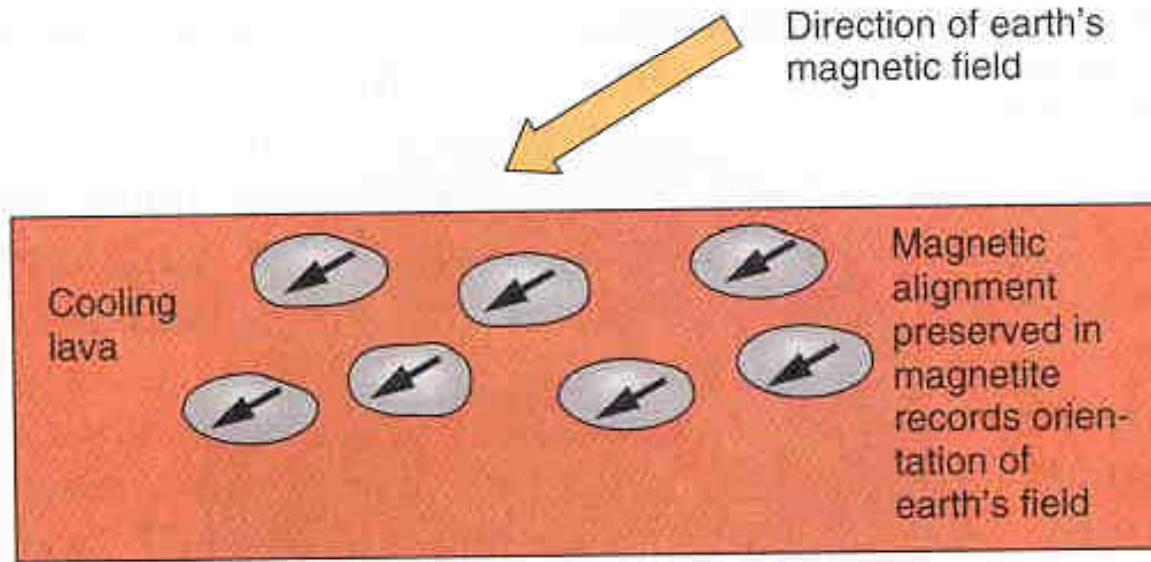
Magnetizaciones parásitas
adquiridas a lo largo de la
historia geológica de la roca



Los granos ferromagnéticos de la roca adquieren su magnetización espontánea a lo largo de la dirección fácil más cercana a la dirección del CMT. La resultante es el **magnetismo remanente natural (MRN)**.

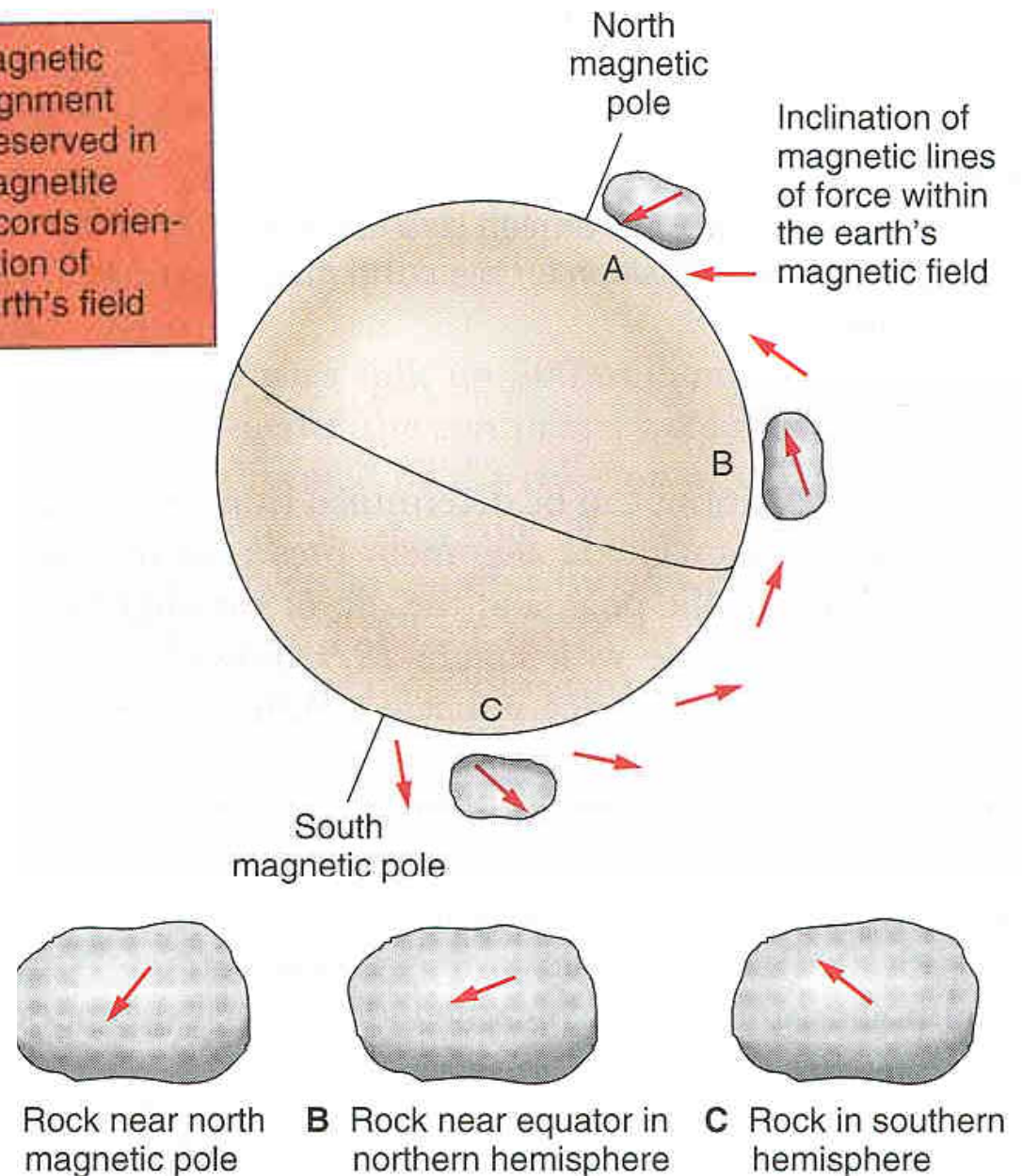
La inclinación magnética depende de la latitud



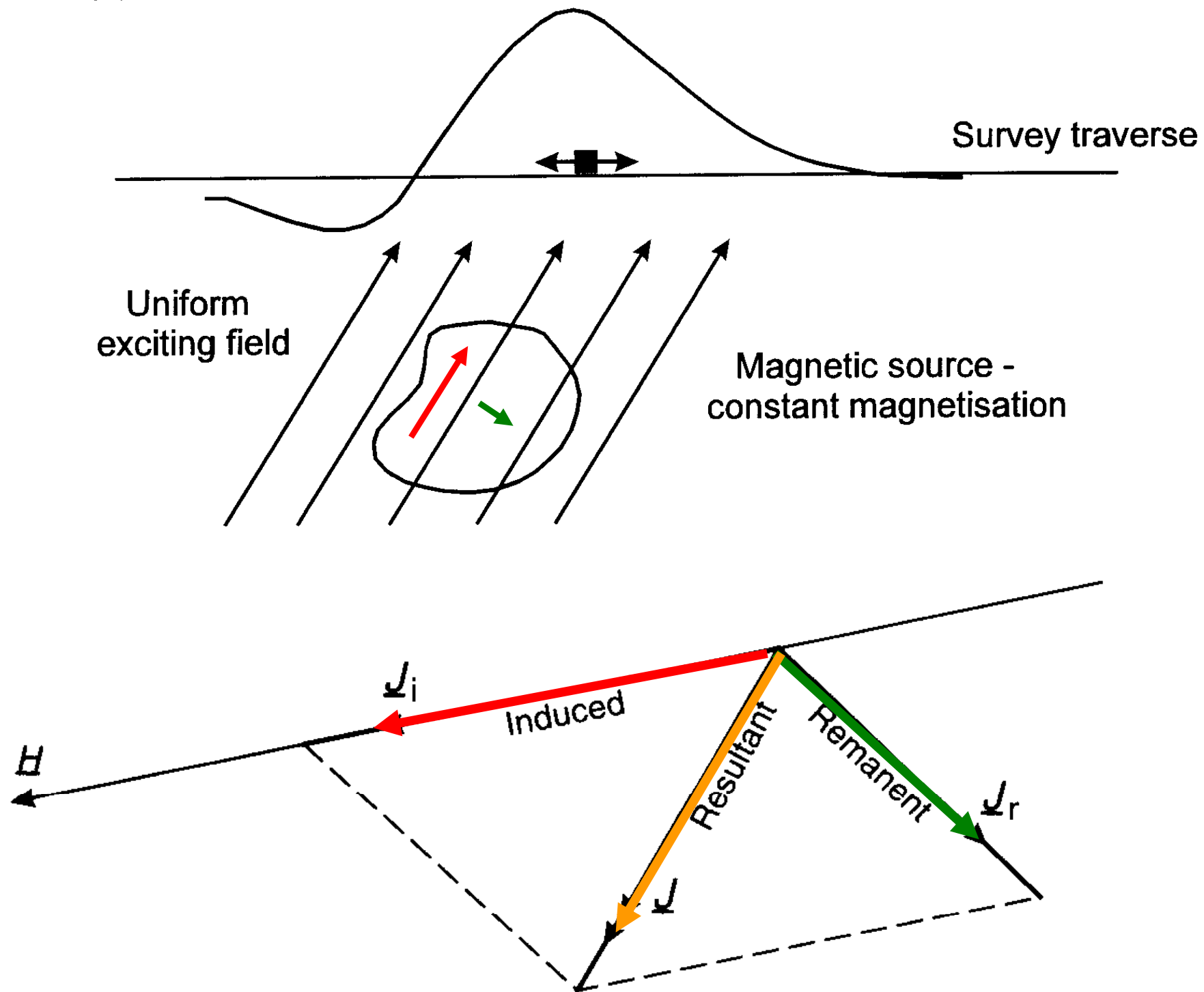


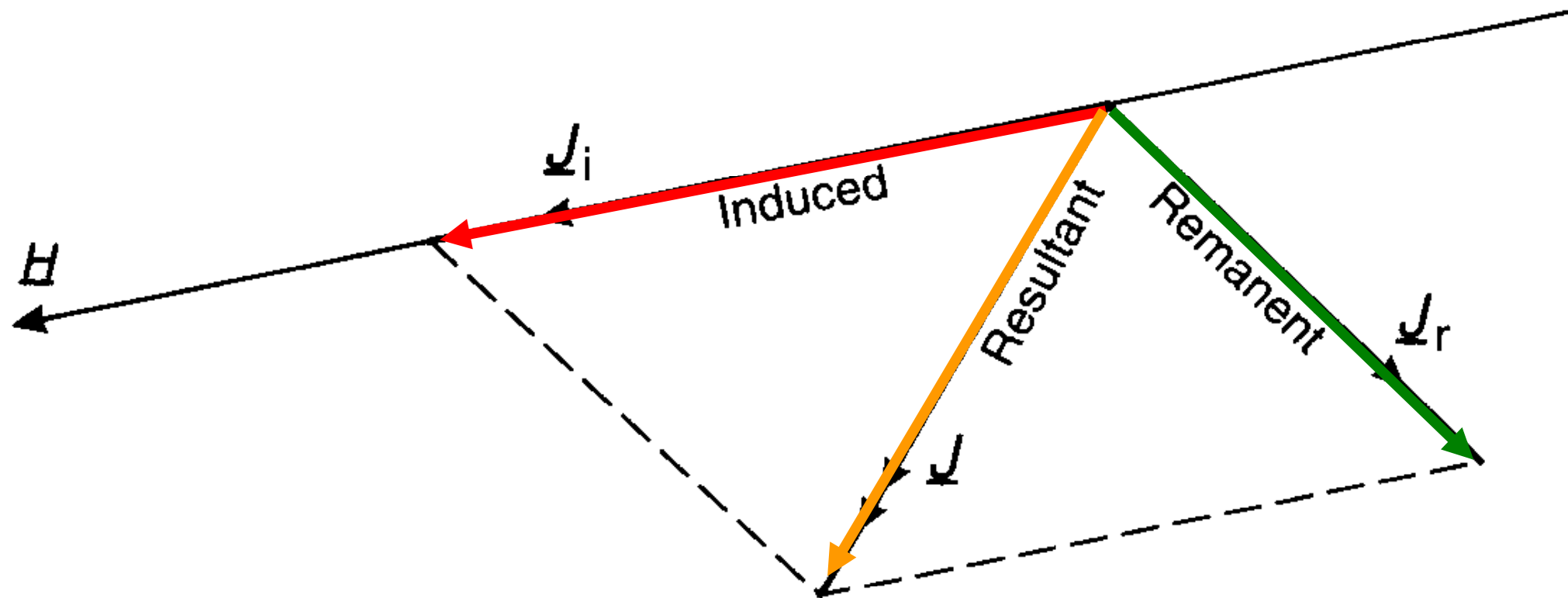
Paleomagnetismo

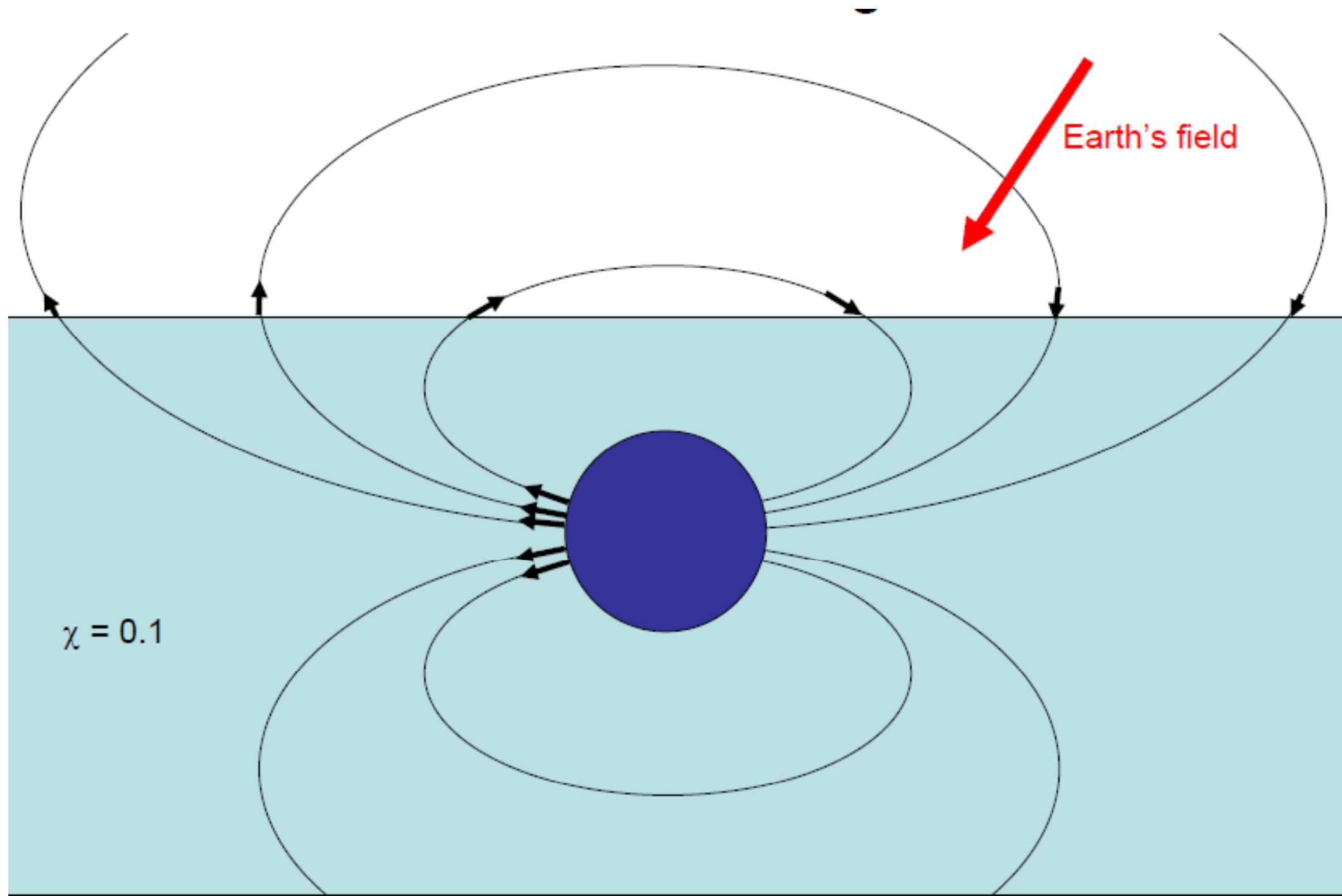
El estudio de la inclinación magnética registrada por la magnetización remanente de las rocas, nos da información acerca de su posición en el pasado geológico.



(a) Conventional survey







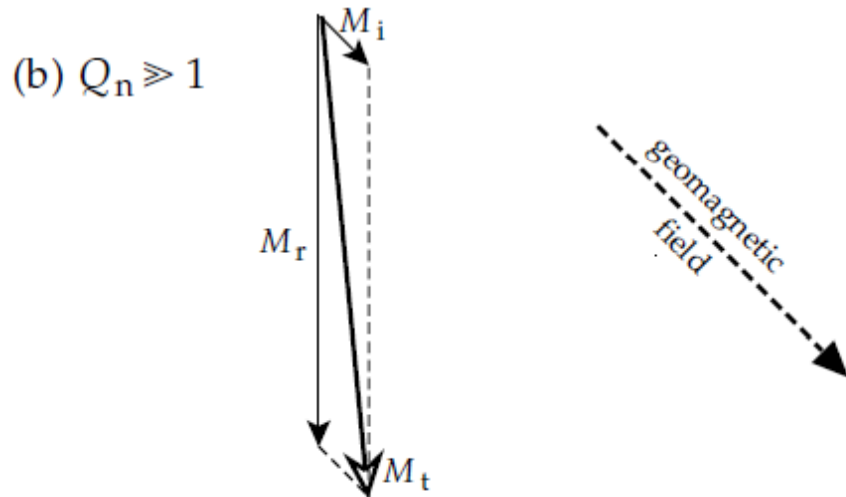
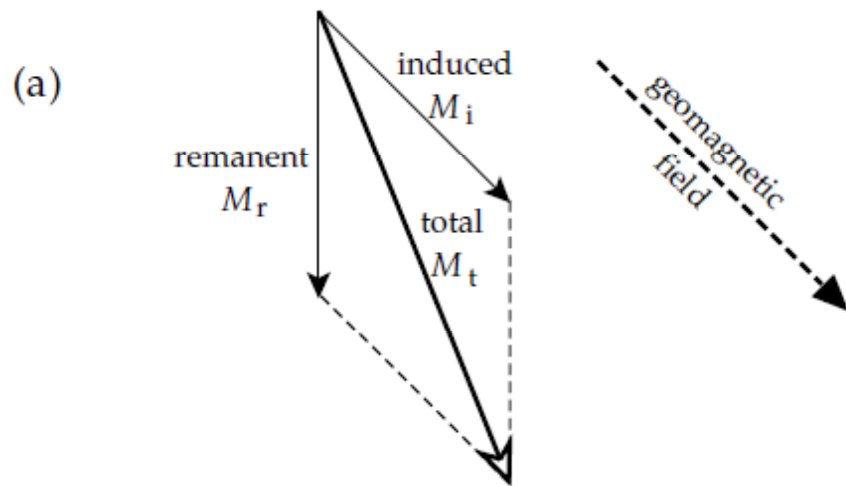
Coeficiente de Königsberger

$$Q = \frac{J_{\text{remanent}}}{J_{\text{induced}}}$$

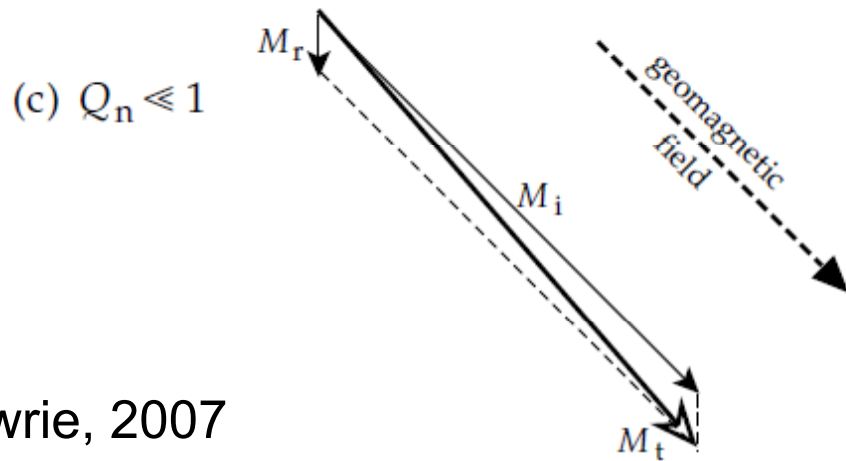
Box 3.5 Königsberger ratio, Q

$$Q = J_r / \kappa(F/\mu_0)$$

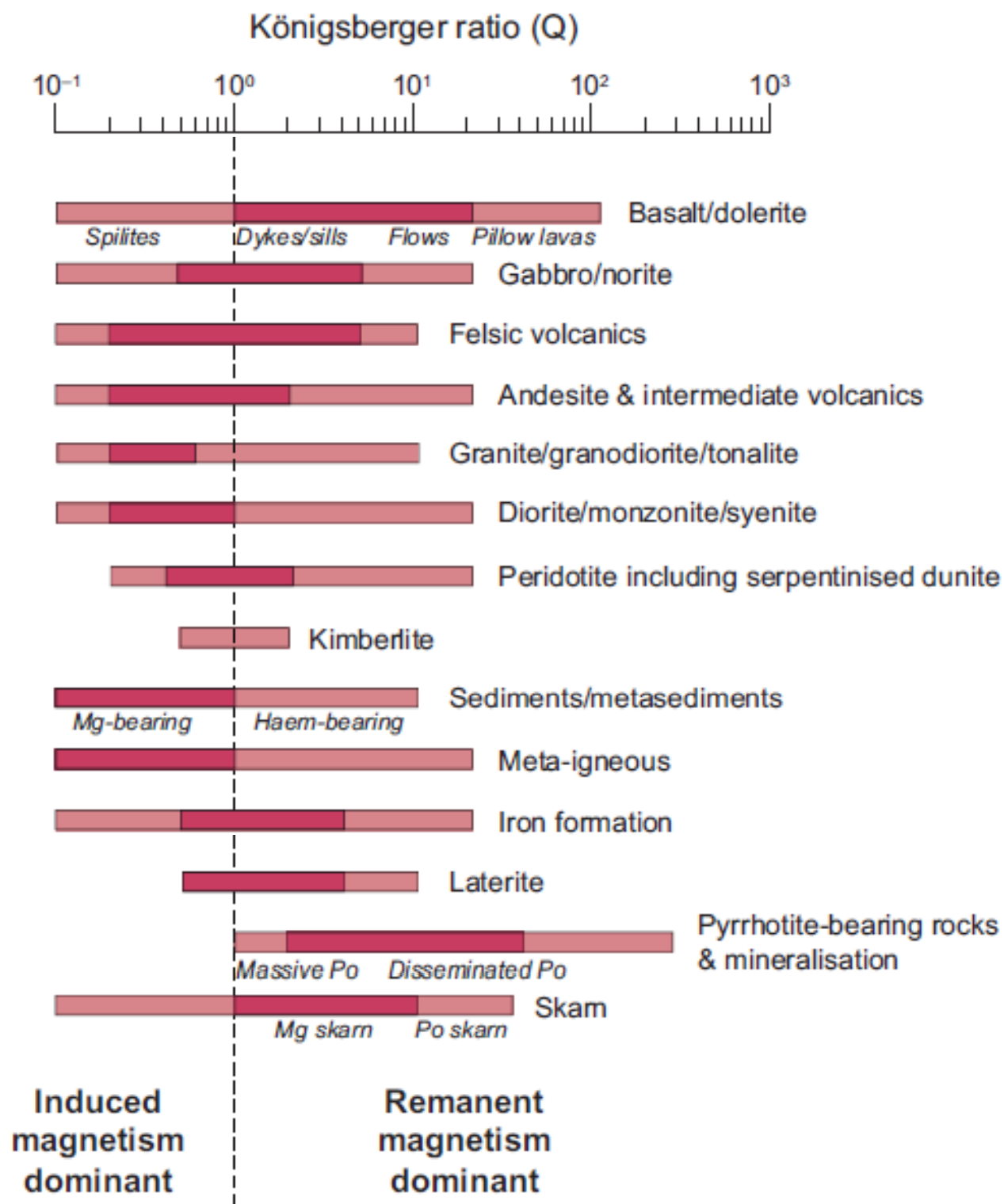
where J_r is the intensity of remanent (NRM) magnetisation, κ is the susceptibility, μ_0 is the permeability of free space and F is the magnitude of the Earth's magnetic field (in tesla) at a given location in the same sense as the B -field (flux density).

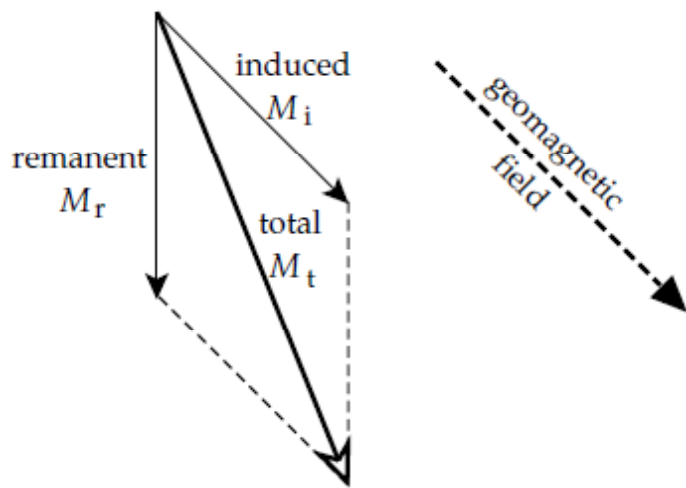


*Domina la
magnetización
remanente*



*Domina la
magnetización
inducida*





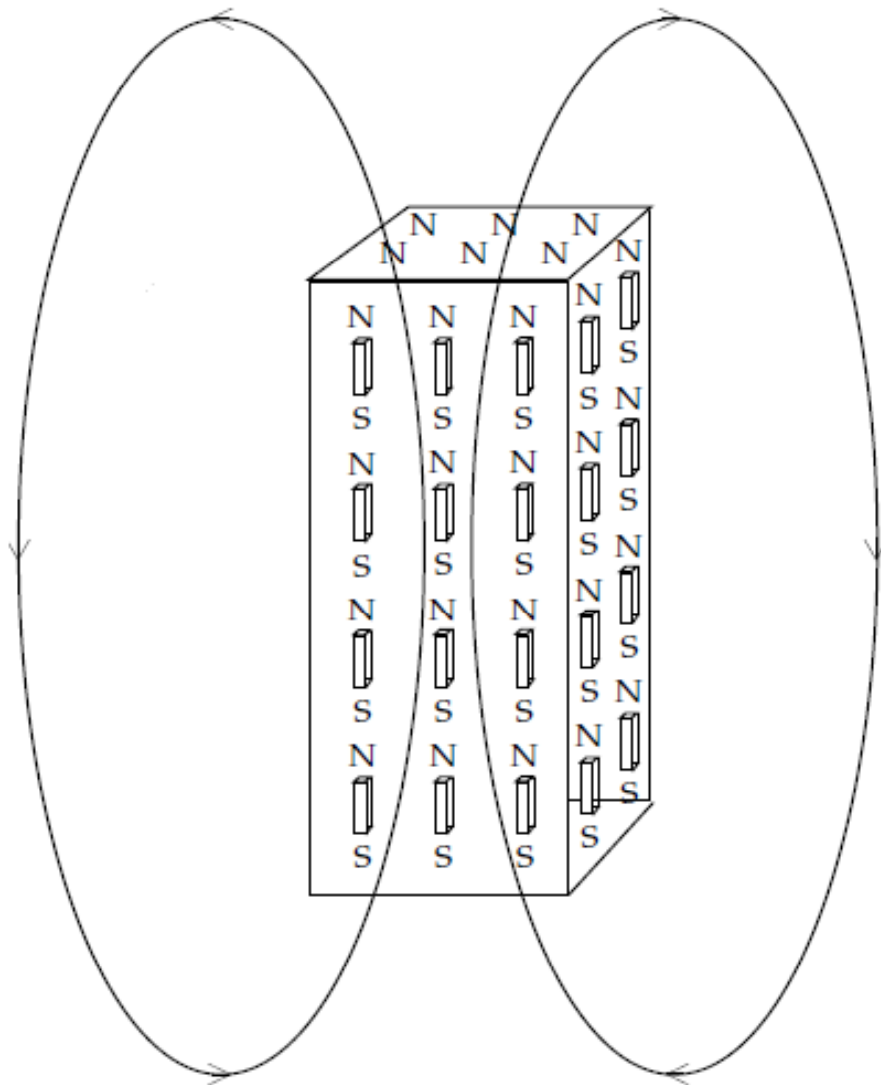
$$J = J_{\text{inducida}} + J_{\text{remanente}}$$

- La magnetización inducida depende de CUÁNTA magnetita tengo en la roca
- La intensidad de la magnetización remanente depende de CÓMO es la magnetita; su dirección, de CUÁNDO se formó el mineral

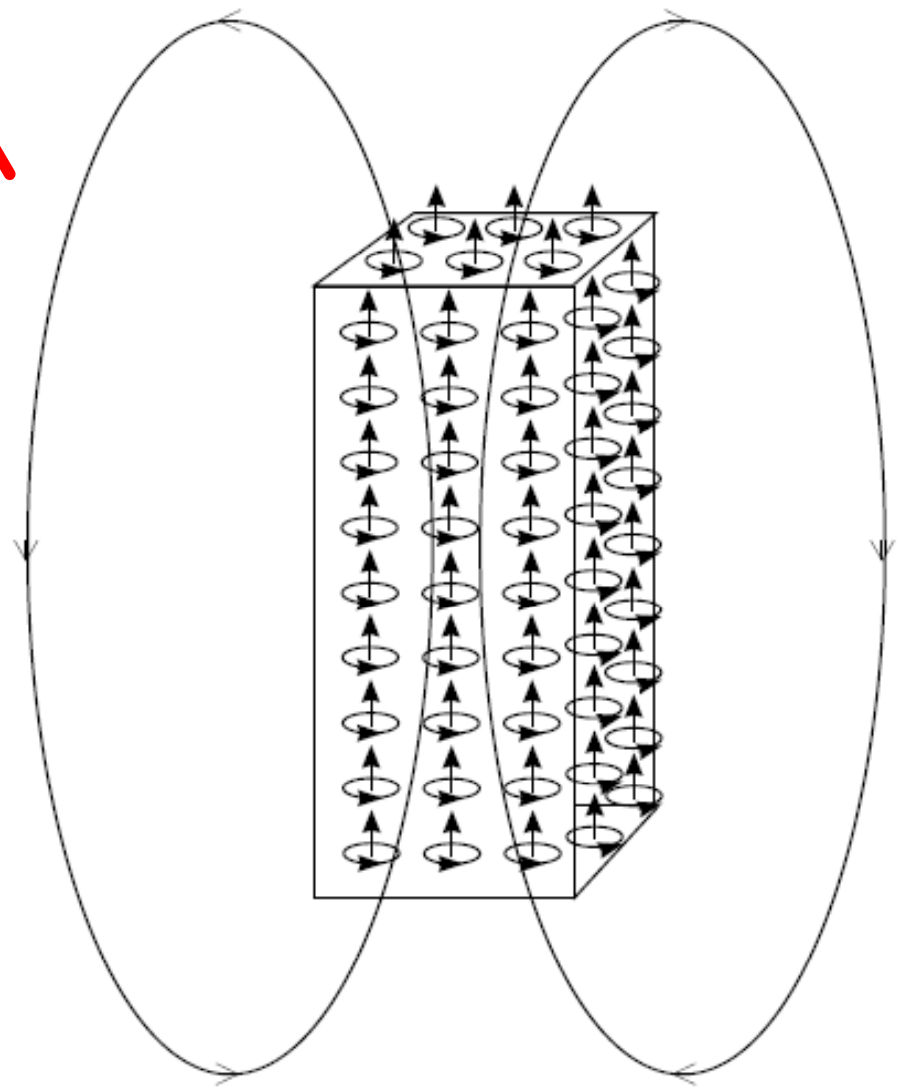
$$Q = \frac{J_{\text{remanent}}}{J_{\text{induced}}}$$

Magnetometría

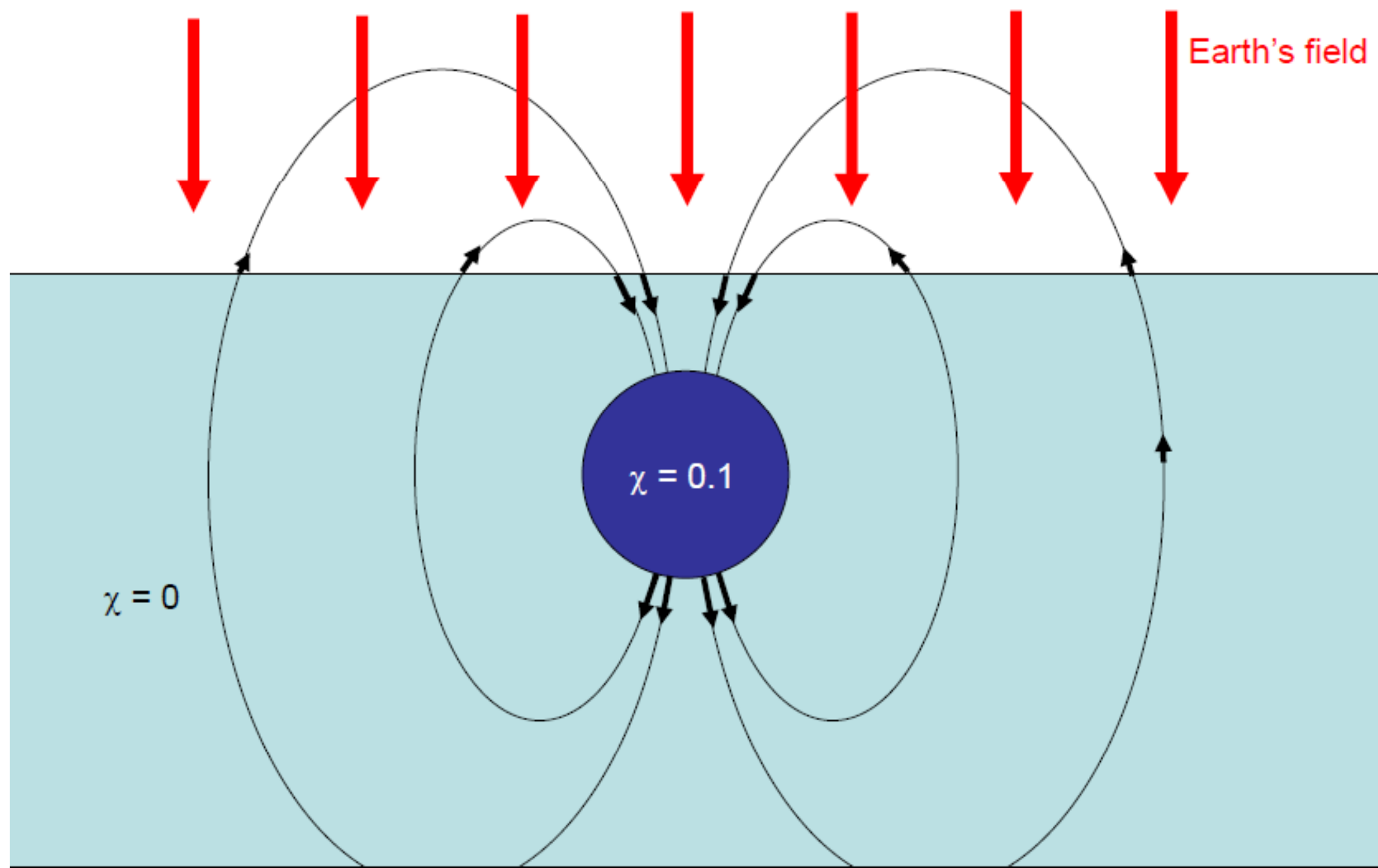
- Dipolo magnético
- Materiales magnéticos naturales
- Campo magnético terrestre
- Remanencia magnética
- Técnicas de adquisición, procesamiento e interpretación

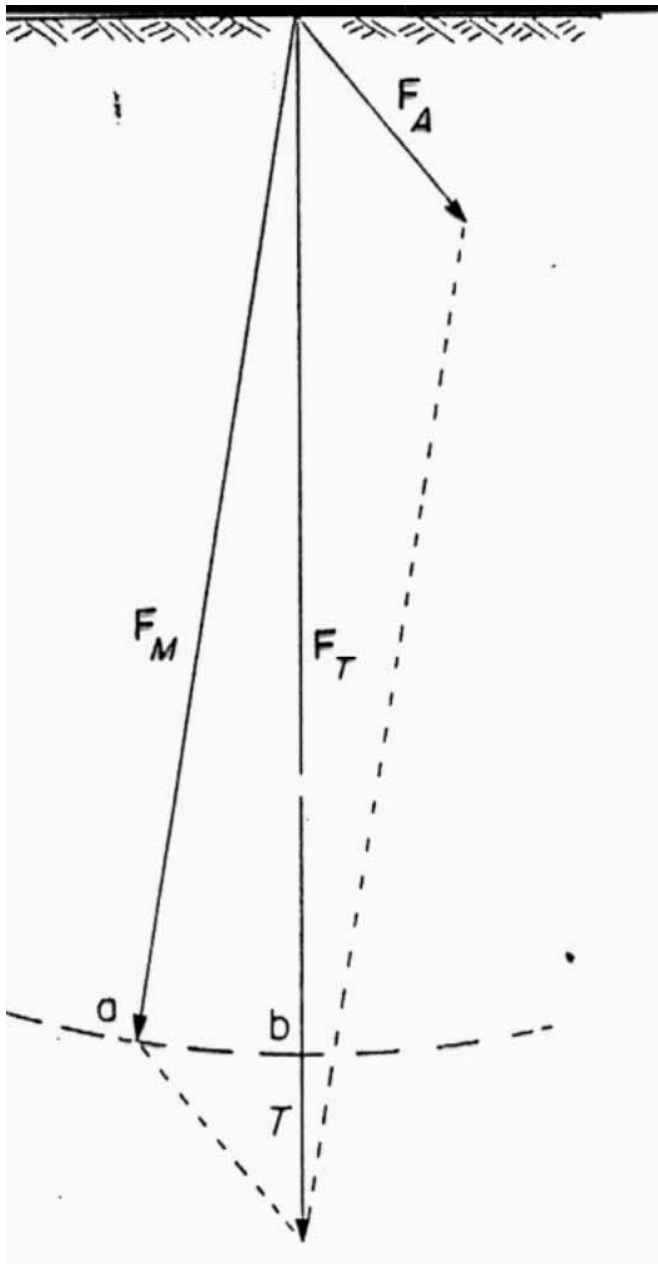


(a)



(b)





Los magnetómetros más usados en la actualidad miden intensidad del campo magnético (módulo de F)

Campo total es la suma vectorial

$$F_T = F_P + F_E + F_C$$

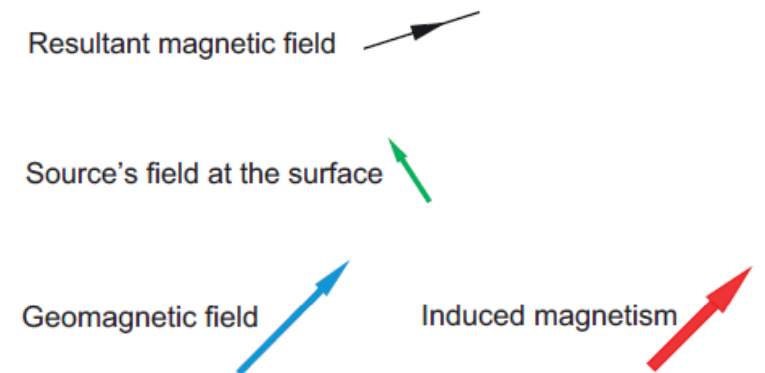
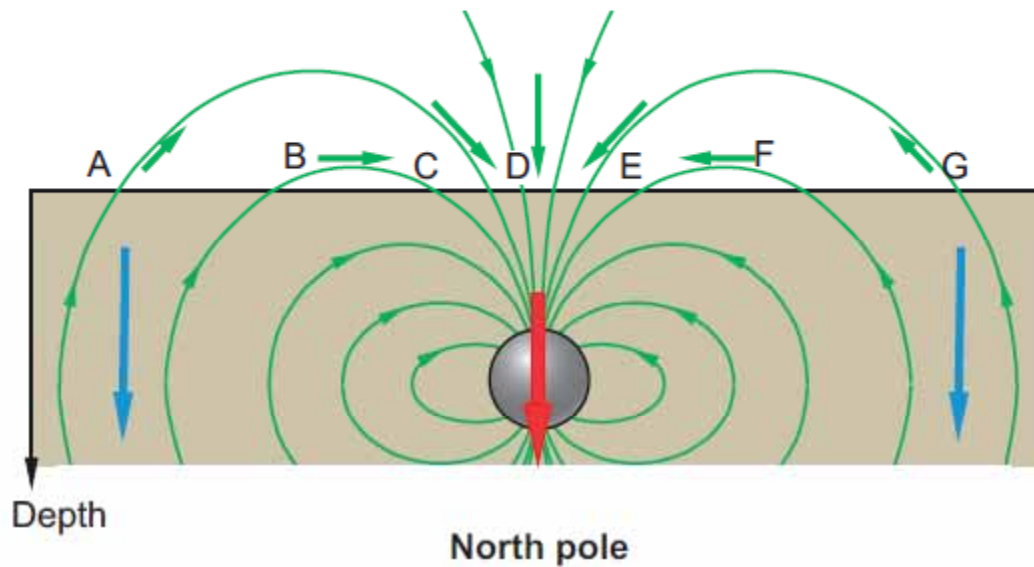
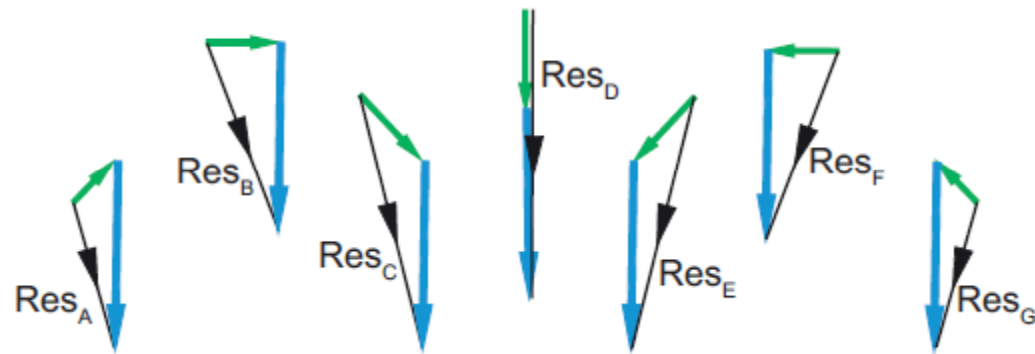
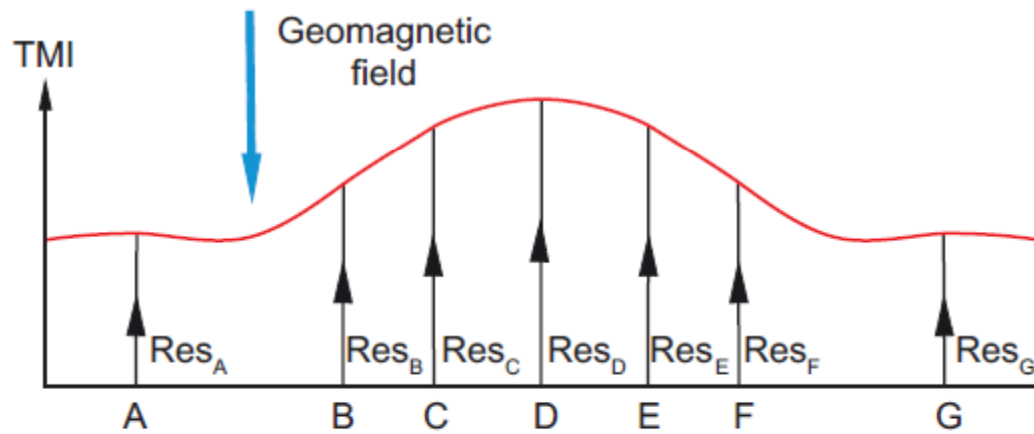
F_P = campo principal

F_E = campo externo

F_C = campo cortical

Cálculo de anomalía del campo total es la resta escalar

$$A = F_T - F_P$$



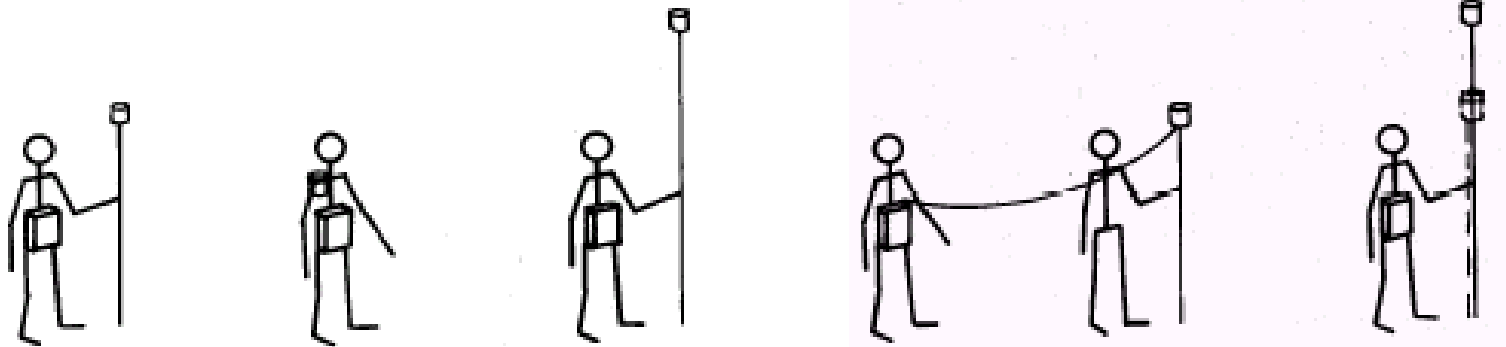
Magnetómetros

De precesión protónica (miden la **intensidad de campo total**)

De bombeo óptico (vapor de *Rb*, *Cs*, *K*) -(miden la **intensidad de campo total**)

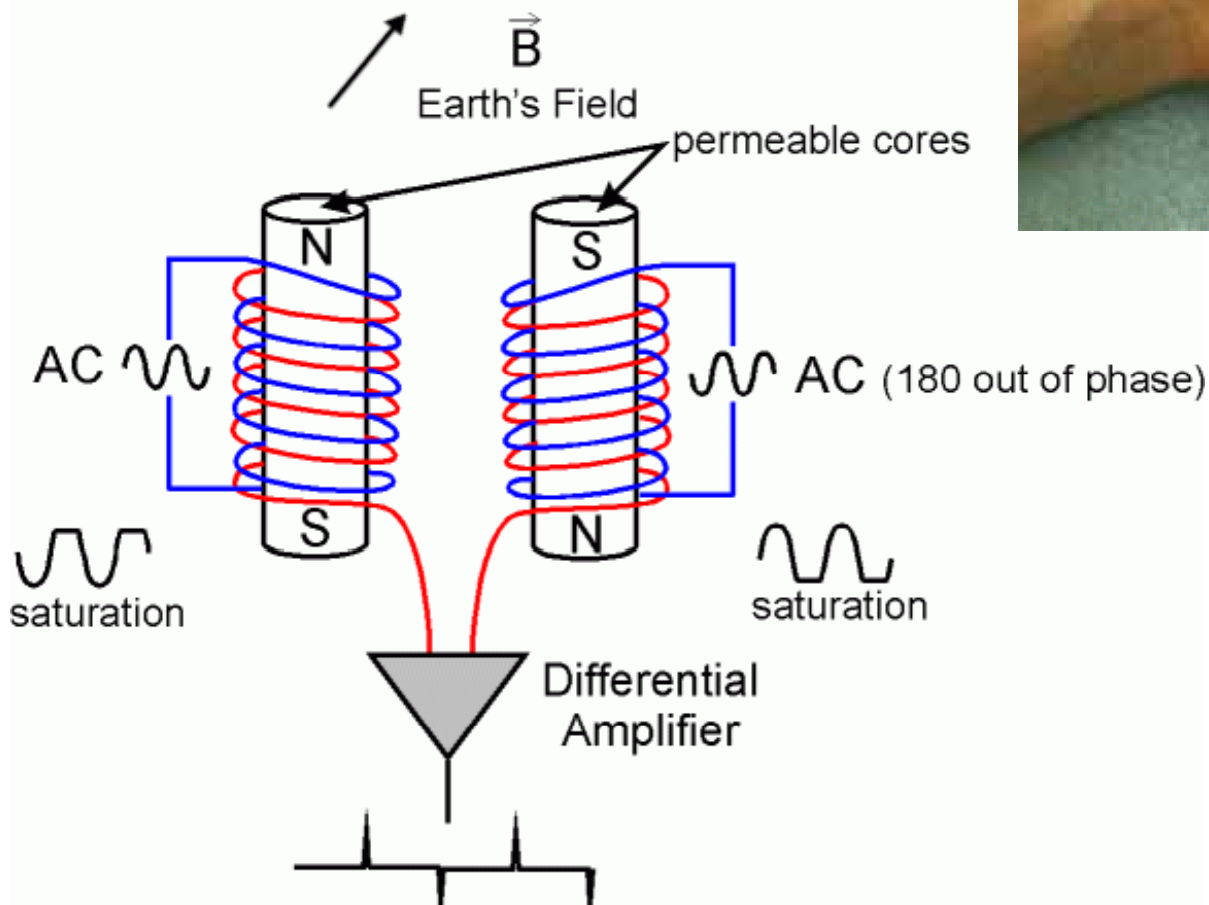
De puerta de flujo (fluxgate) -(miden **intensidad de una componente del campo**)

Gradiómetros

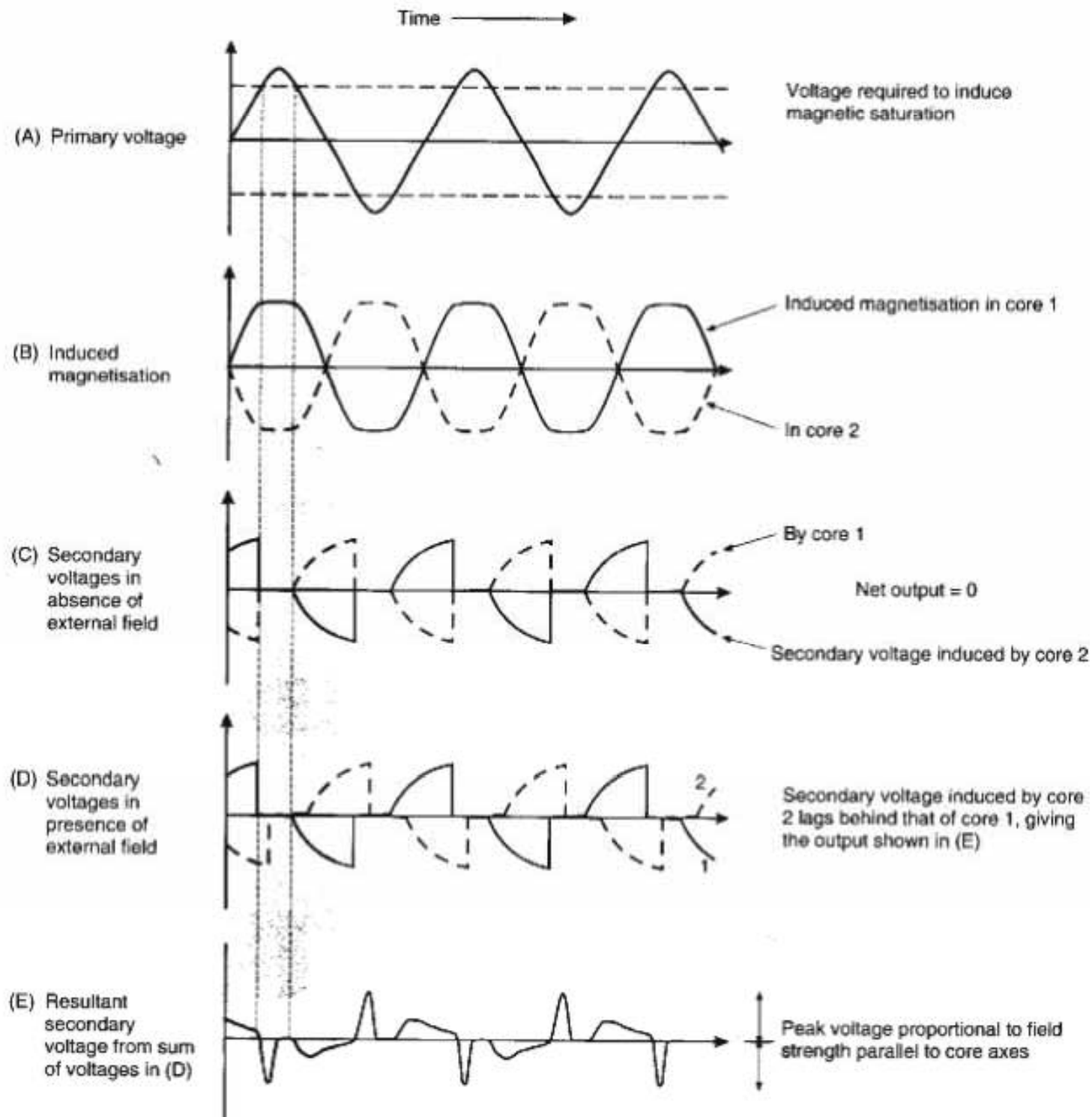


Magnetómetro fluxgate

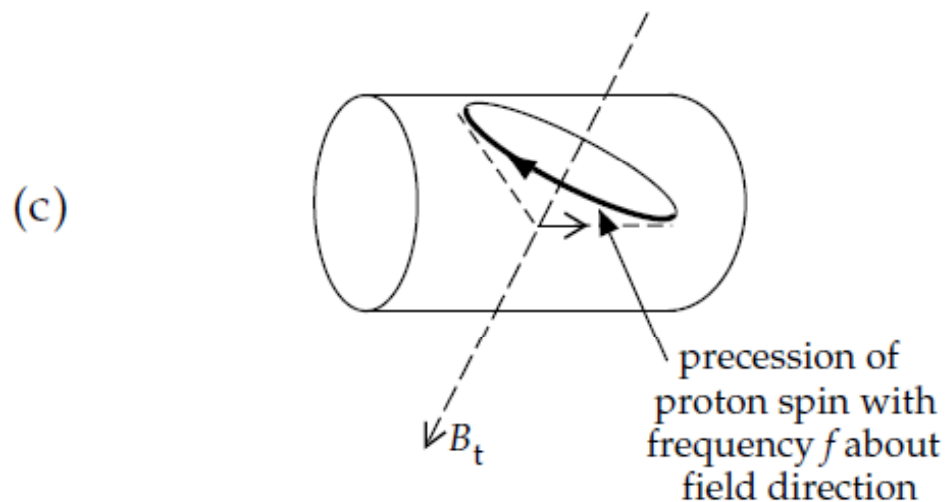
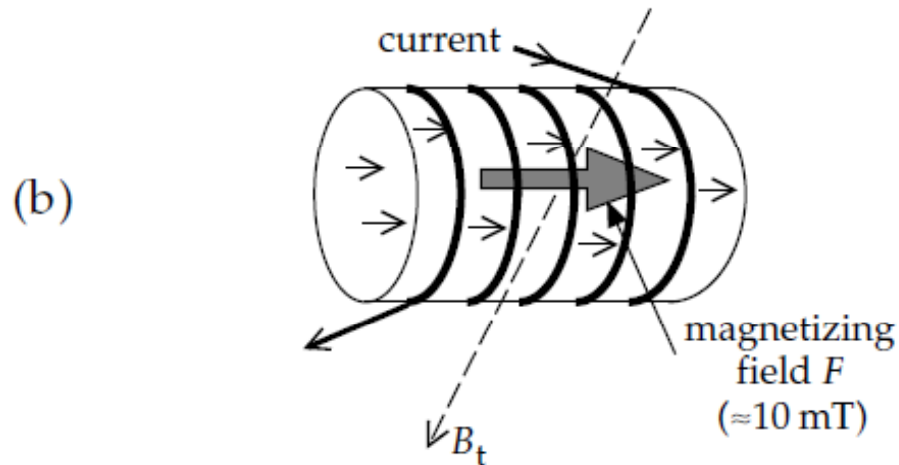
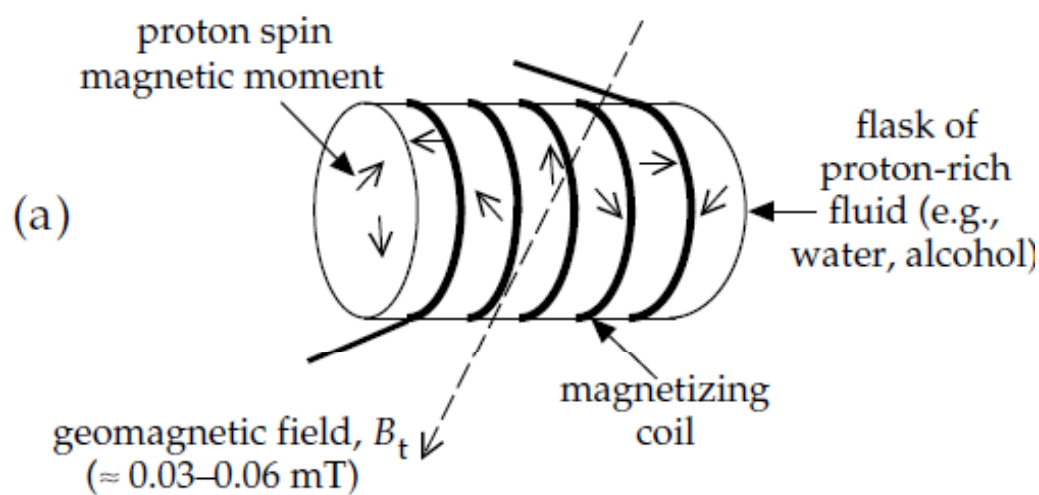
Dos bobinas montadas con sentidos opuestos sobre núcleos de muy alta permeabilidad y baja coercitividad (Mumetal, Permalloy)



En ausencia de campo externo sus magnetizaciones se compensan.
Mide la componente del campo en la dirección del eje de las bobinas.
Permite medir en forma continua.



Magnetómetro de precesión protónica



Recipiente con líquido rico en protones (querosene, alcohol), rodeado por un solenoide.
Mide la frecuencia de precesión de los protones al retirar el campo polarizante.

$$B_t = \frac{2\pi}{\gamma_p} f$$

Coeficiente giromagnético del protón

No permite la medición continua.
El sensor se orienta aproximadamente transversal al campo magnético.





Figure 19. G-856AX console display and keypad.

Efecto Overhauser

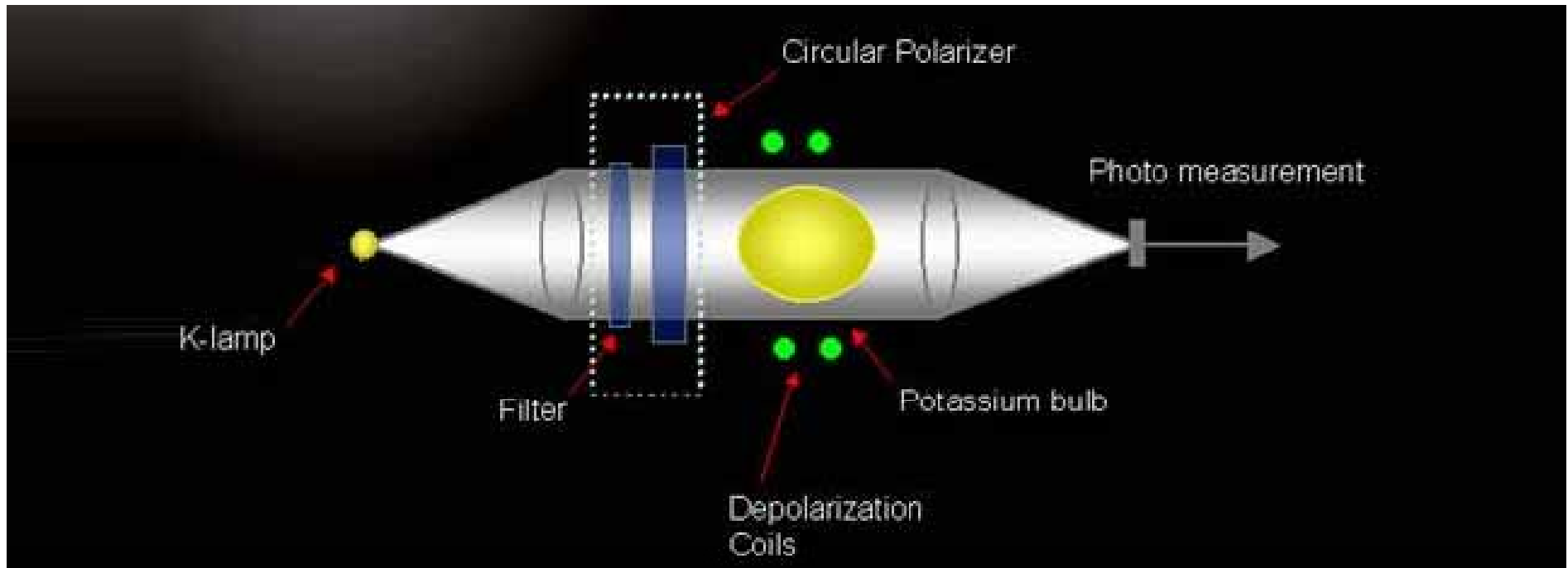
Es una modificación impuesta al magnetómetro protónico tradicional, para conseguir mayor señal, en menos tiempo, y con menos consumo de energía.

Consiste en agregar un fluido con alto porcentaje de electrones libres.

En lugar de un campo polarizante fuerte, se aplica un campo alterno débil de radiofrecuencia. Este polariza a los electrones, que a su vez se acoplan a los protones.

La polarización es unas 5000 veces mayor, con menos consumo.

Magnetómetro de bombeo óptico (o de vapor de Cs, Rb, o K)

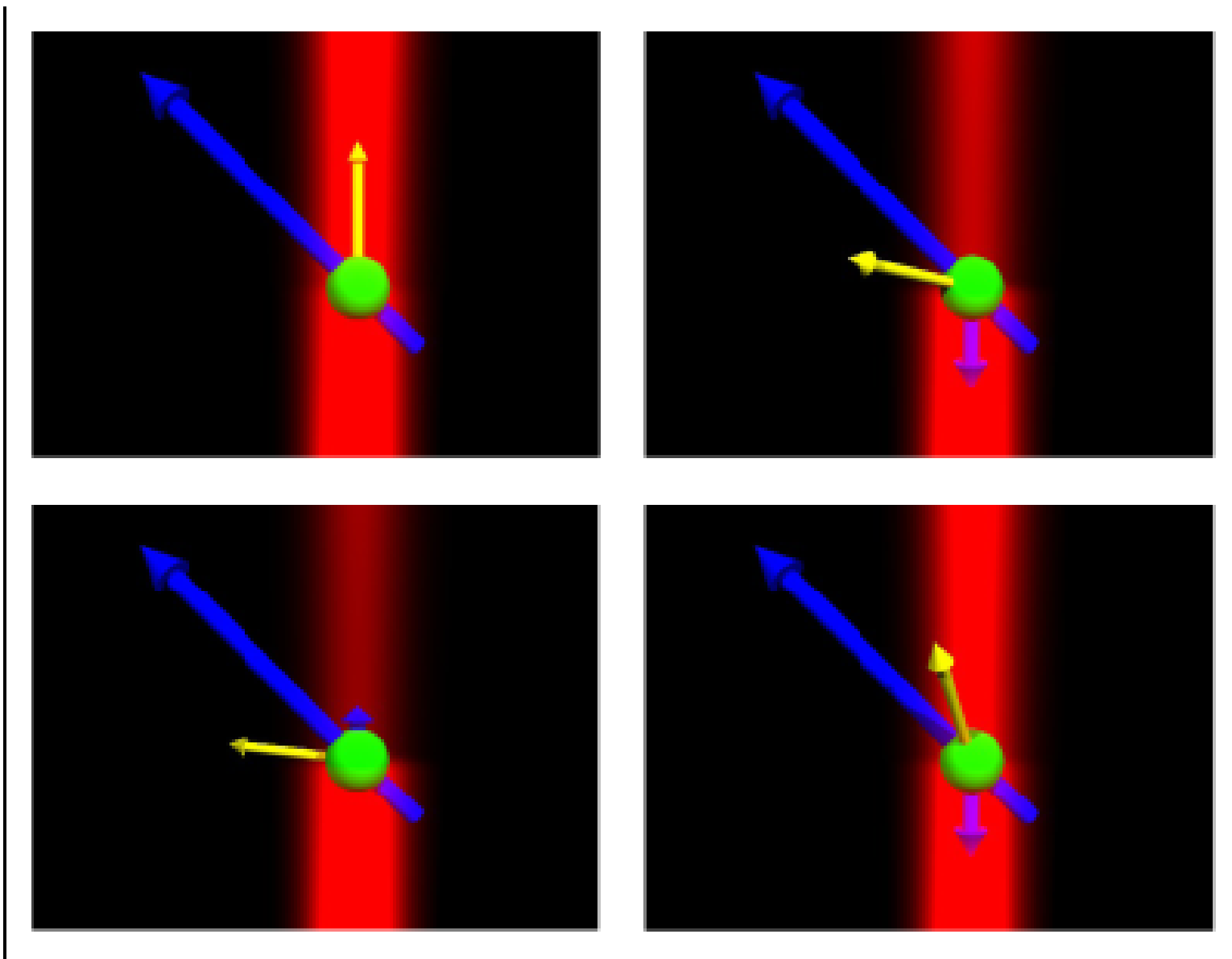


También se mide la frecuencia de precesión, en este caso de los electrones desapareados en la capa más externa de los metales alcalinos en estado vapor.

Se energiza con luz del mismo elemento, circularmente polarizada (“bombeo óptico”), y aplicando una radiofrecuencia de despolarización. Se mide la frecuencia en la variación de intensidad de la luz transmitida.

$$B_t = \frac{2\pi}{\gamma_e} f$$

Coeficiente giromagnético del electrón (1800 veces mayor que el del protón)



Azul: campo magnético externo. Amarillo: momento magnético del electrón precediendo, y modulando la intensidad del haz luminoso.



Medición casi continua,
alta sensibilidad.
El sensor se orienta
oblicuamente a las
líneas de campo
magnético.

Método	Sensibilidad	Tasa de adquisición por ciclo
Fluxgate	1 nT	Continuo
Precesión protónica	Convencional: 0,1nT	Convencional: 3 a 5 segundos
	Overhauser: 0,2nT	Overhauser: 0,5 a 3 segundos
Bombeo óptico	0,01nT	0,1 segundos

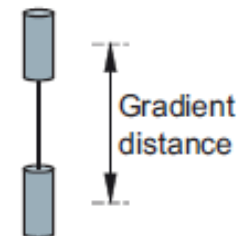
Gradiómetros

Consisten en dos sensores (de cualquiera de los magnetómetros) separados por una distancia fija.

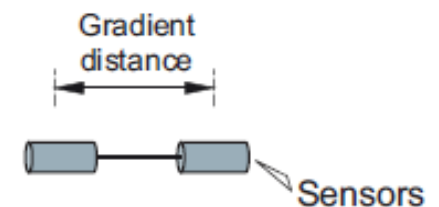
Se mide el gradiente, es decir, la variación en la intensidad de campo en función de la distancia, en nT/m.



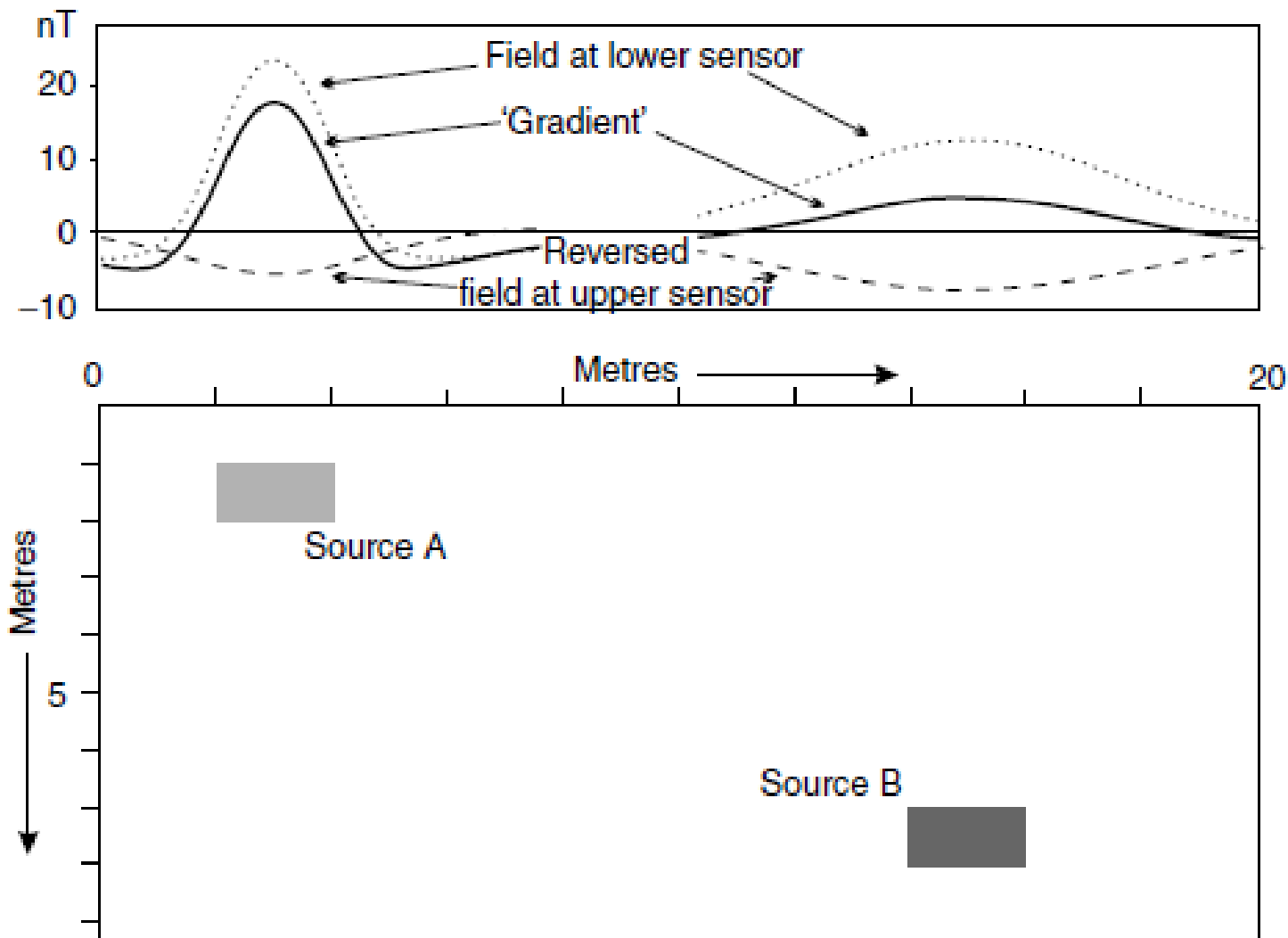
Vertical gradient

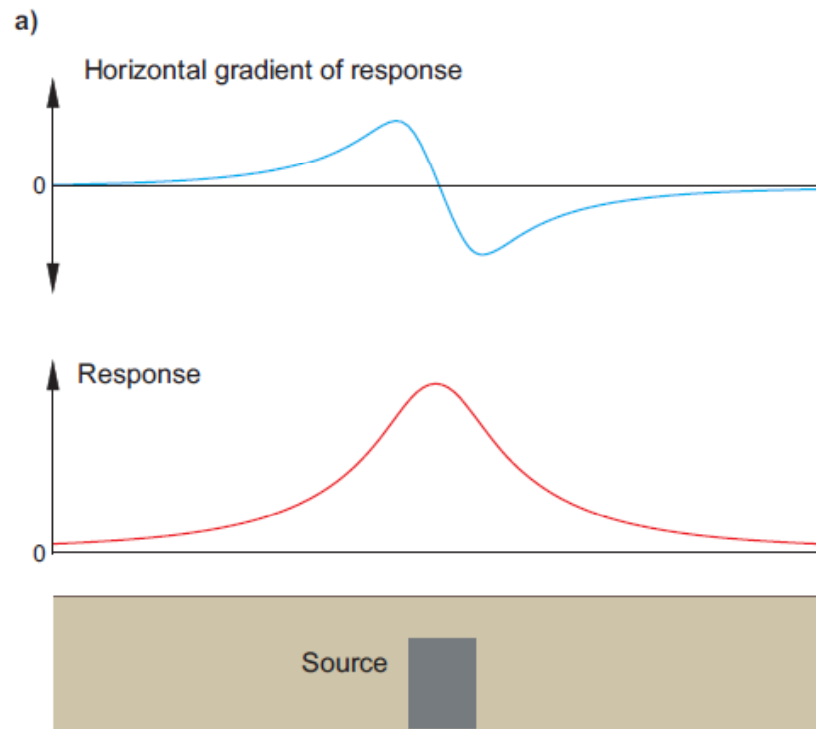


Horizontal gradient

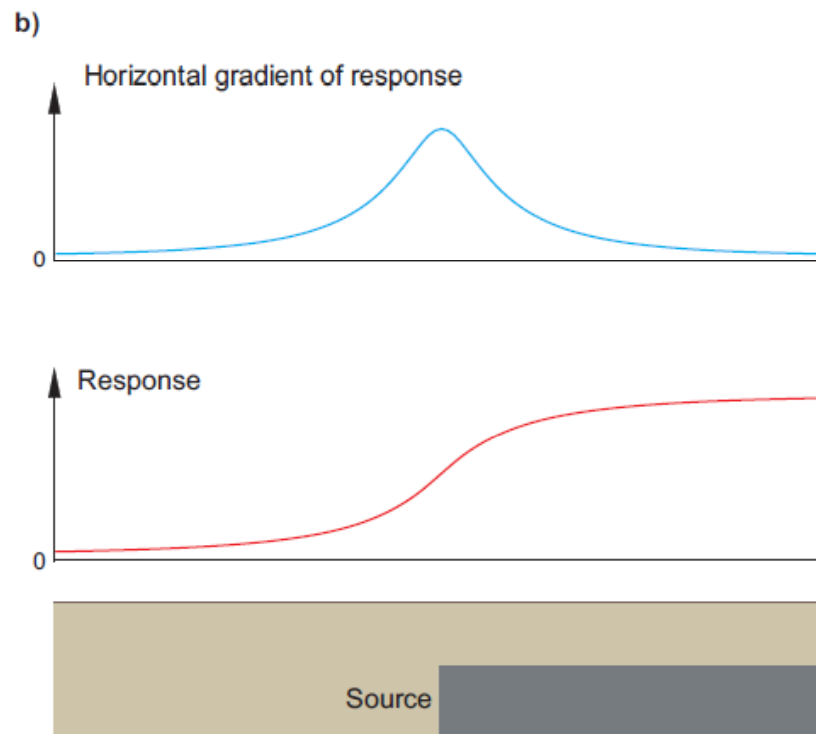


Las mediciones de gradiente enfatizan las fuentes cercanas a la superficie
(muy usado en arqueología)





En términos generales, las mediciones de gradiente mejoran la resolución espacial, pero su aplicación está limitada a fuentes someras (la respuesta de fuentes profundas se atenúa).



Métodos de relevamiento

- Relevamientos Terrestres:

Normalmente desarrollados como perfiles o serie de perfiles. Se puede ajustar la ubicación con alta precisión

- Útiles en áreas pequeñas con alta resolución (Minería, arqueología, ambiental)
- En áreas más grandes, como apoyo a otros estudios (ej. gravedad)

- Relevamientos Aéreos:

Utilizados mayormente en relevamientos regionales (avión) o locales (helicóptero). Serie paralela de líneas de vuelo con enlaces. Posición del avión es crítica

- Útiles en minería, relevamientos sistemáticos oficiales, exploración de HC

- Relevamientos Acuáticos:

Mayormente como complemento de otros estudios (ej. sísmica) en relevamientos regionales o específicos en cuerpos de agua más pequeños (variante de los terrestres)

- Útiles en estudios académicos, ambientales, arqueológicos, exploración de HC