

Magnetismo

Geofisica
Scienze Geologiche – UNIFE
Aa 2018-2019
Concetti base

N. Abu Zeid

metodi magnetici

parte 02

Magnetismo: riassunto Unità



Descrizione parametro	Simbolo	Unità SI	Unità c.g.s.	cgs/MKS
Polo magnetico	$\mathbf{p}$	$\mathbf{A\ m}$	$\mathbf{(dina)^{1/2}.cm}$	
Permeabilità magnetica	μ	$\mathbf{H/m}$	adimensionale	$\mathbf{1/4\pi \times 10^{-7}}$
Permeabilità magn. relativa	μ_r	adimensionale	Adimensionale	
Intensità campo indotto	$\mathbf{B}$	$\mathbf{Wb/m^2=Tesla}$	Gauss/gamma	$\mathbf{10^4}$
Intensità campo Magnetico	$\mathbf{H}$	$\mathbf{A/m}$	Oersted	$\mathbf{4\pi \times 10^3}$
Intensità di magnetizzazione	$\mathbf{J\ o\ I}$	$\mathbf{A/m}$	Oe	$\mathbf{4\pi \times 10^3}$
Momento Magnetico	$\mathbf{M}$	$\mathbf{A.m^2}$	$\mathbf{Oe.cm^3}$	$\mathbf{10^3}$
Suscettività Magnetica	$\mathbf{K\ o\ \chi}$	adimensionale		
Nota: Gauss= $\mathbf{(dina)^{1/2}.cm^{-1}}$				
Nota: 1 Gamma= $\mathbf{10^{-5}\ Oe}$				
1 Gamma=1 nT (nano Tesal)				
Nota: 1 Tesla= $\mathbf{10^4\ Oe}$				
Nota: Henry: unità di misura dell'induttanza elettrica. In un induttore di 1 H, una variazione di corrente di 1 A al secondo genera una f.e.m. di 1 volt. $\mathbf{H/m=Wb/A.m}$				

Magnetismo: il campo magnetico – Intensità di Magnetizzazione

$$I = \frac{n^\circ \text{ poli indotti nell'area unitaria}}{A} = M/A \quad \boxed{\text{In (A/m)}}$$

$$F=H$$

c.m.t.

NB:

$$F=H$$

$$K=\chi$$

$$I \propto F$$

$$I = k F$$

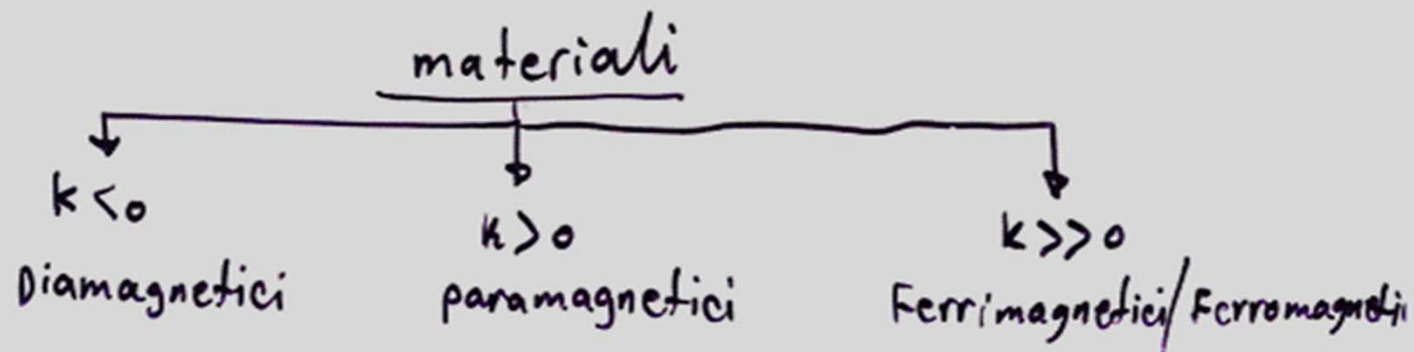


dove k : la suscettività magnetica

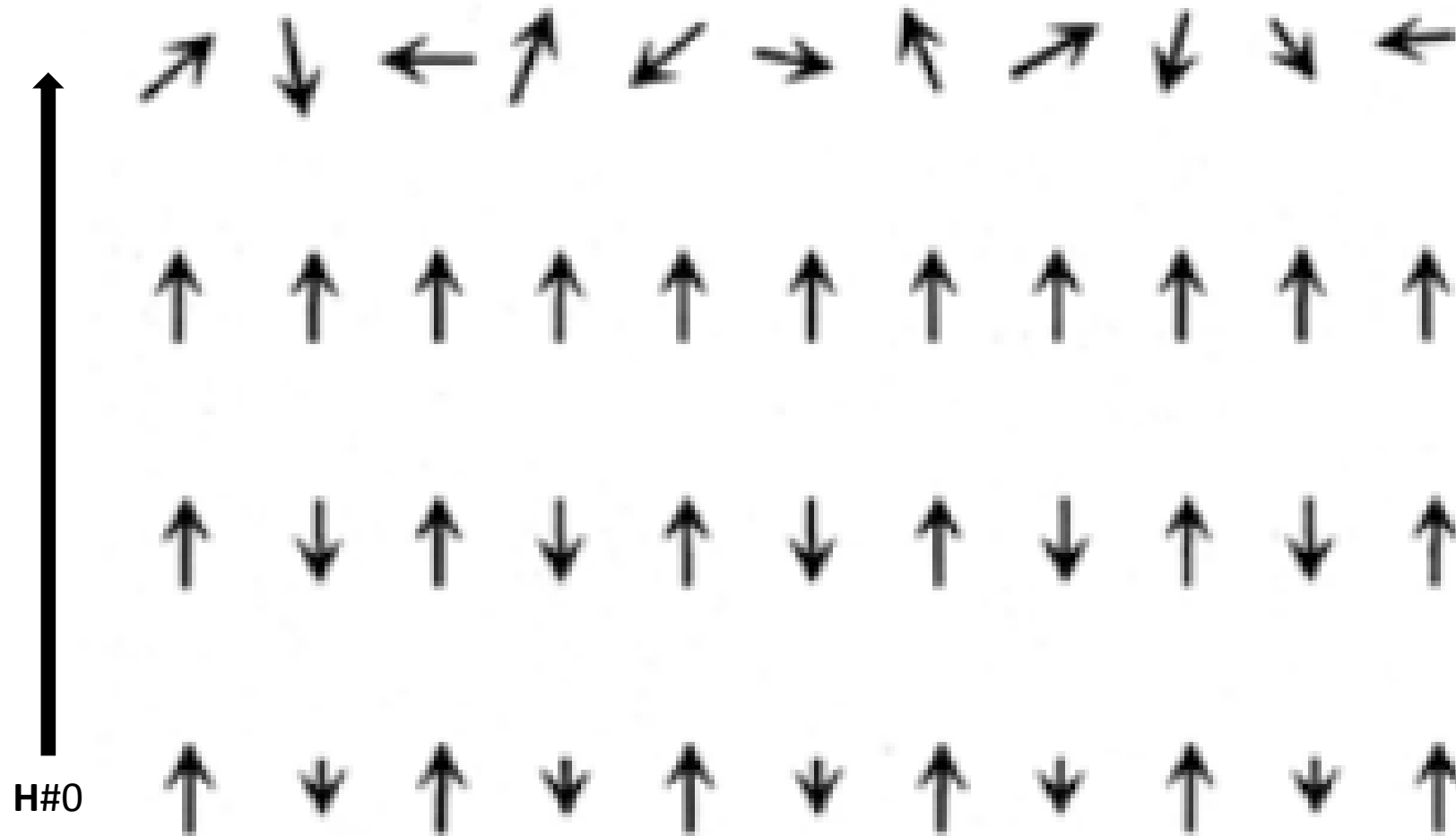
k : è la misura di quanto suscettibile un materiale è di diventare magnetizzato

NB:

$$K=\chi$$

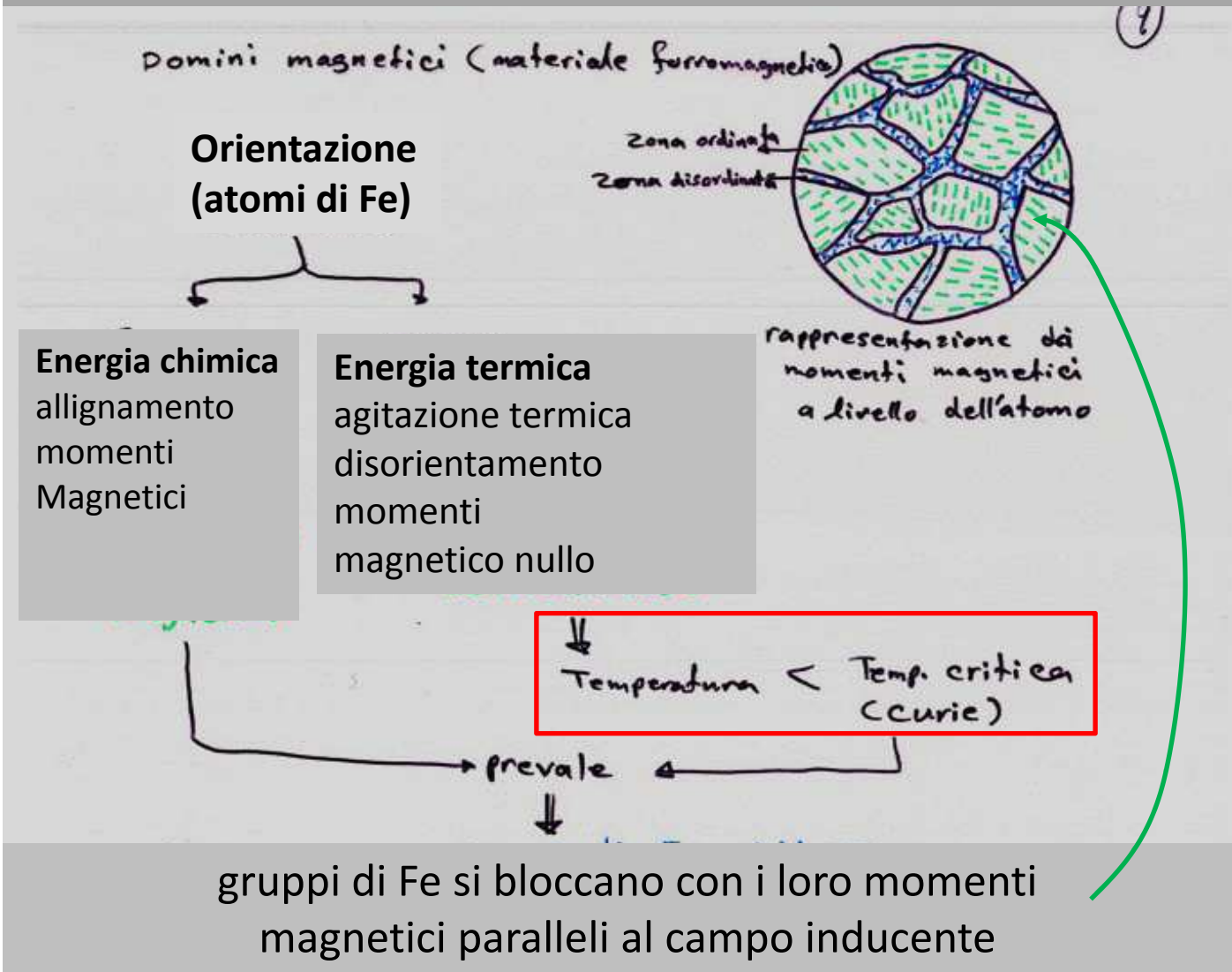


Magnetismo: il campo magnetico – effetto presenza di un campo magnetico esterno sui dipoli magnetici



Magnetismo: il campo magnetico – Intensità di Magnetizzazione

A livello dell'atomo



I dipoli orientati o ordinati rispetto al c.m. esterno sono noti come domini di **Weiss** e sono di qualche micron di dimensione

Magnetismo: il campo magnetico – Intensità di Magnetizzazione

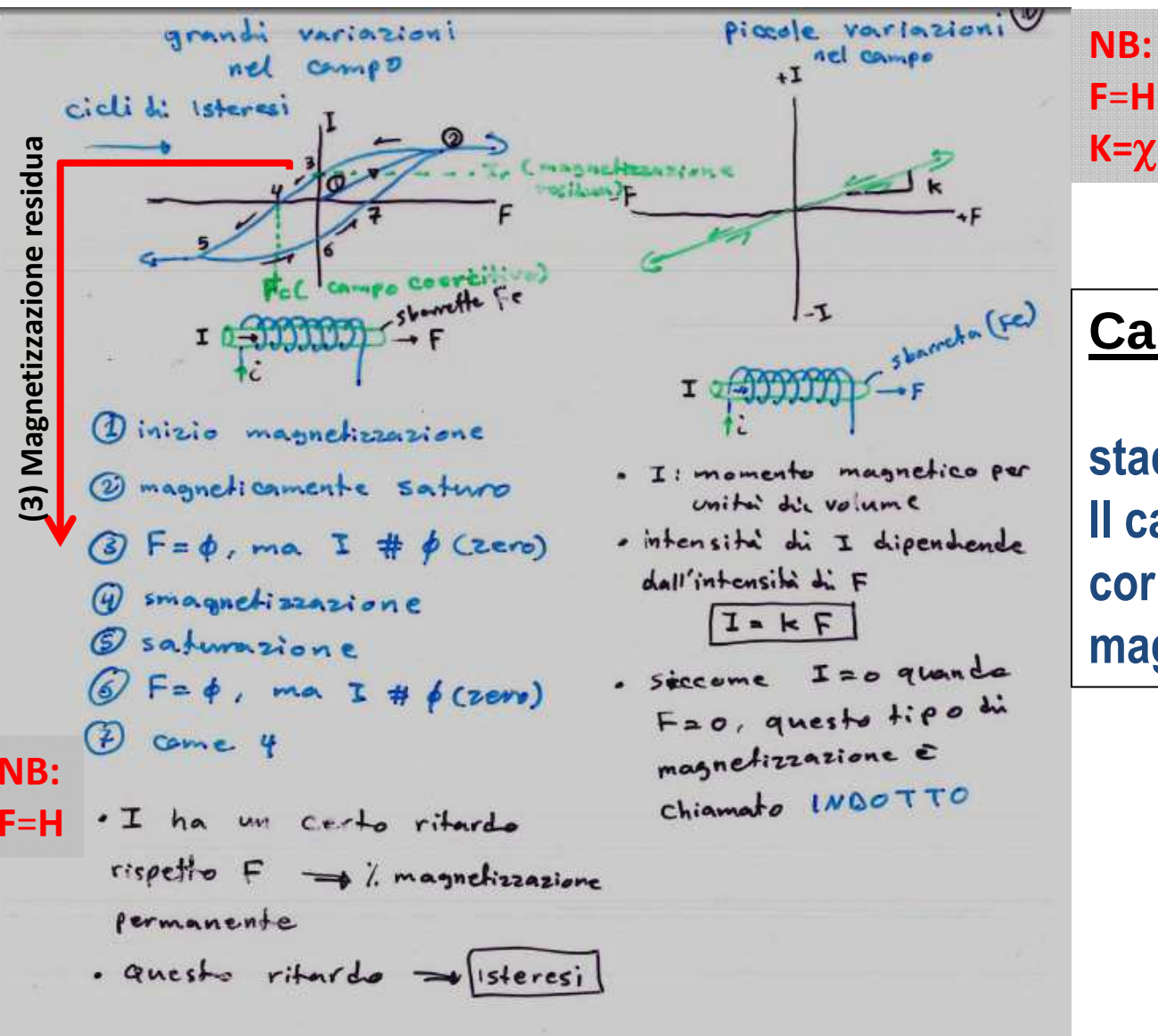
Chi controlla l'orientamento dei domini magnetici?

- Un altro magnete o altri
- I campi dei domini vicini
- Il c.m.t.

E la magnetizzazione ?

- Temperatura
- Intensità campo magnetico
- Suscettività materiali (volumetrica)

Magnetismo: il campo magnetico – il ciclo isteresi



Campo coercitivo (F_c):

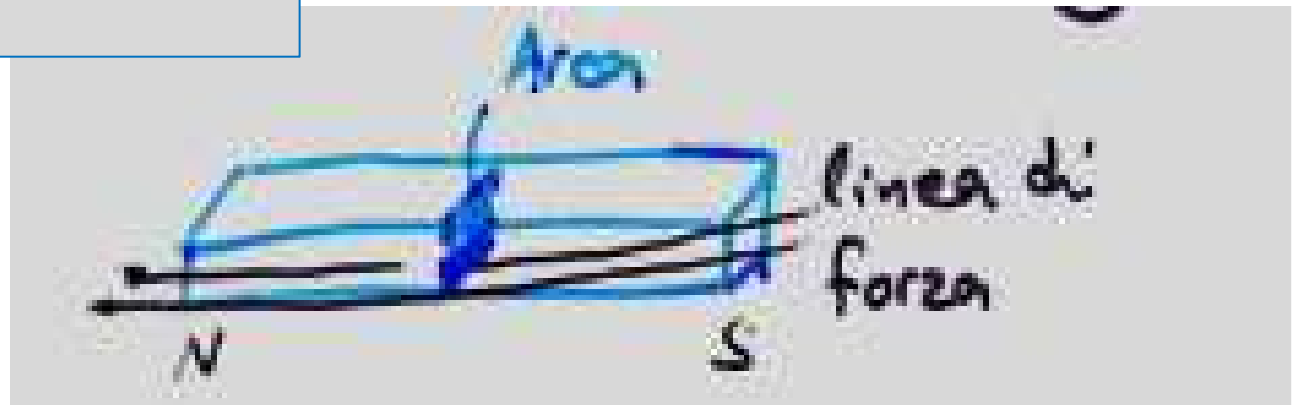
stadio 4 e 7 (ciclo isteresi):
 Il campo magnetico in corrispondenza del quale la magnetizzazione si annulla.

Piccoli variazioni del campo magnetico producono effetti reversibili mentre grandi variazioni producono effetti irreversibili.

Magnetismo: il campo magnetico – magnetizzazione indotta (**B**)

assunzione:

- materiale ferromagnetico (K o $\chi \gg 0$)
- campo magnetico inducente variabili entro limiti ristretti



$$\mathbf{B}(\text{nel vuoto}) = \mu_0 \cdot \mathbf{H} \text{ (o } \mathbf{F})$$

NB:
F=H

Magnetismo: il campo magnetico – magnetizzazione indotta (**B**)

$$\mathbf{B}(\text{nel vuoto}) = \mu_0 \cdot (\mathbf{H} + \mathbf{I}); I = 0$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{H}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot (\mathbf{H} + \chi \mathbf{H})$$

NB:

F=H

K=χ

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \cdot (1 + \chi)$$

definito il valore della permeabilità magnetica assoluta del mezzo magnetizzabile, ovvero

$$\mathbf{B} = \mu \mu_0 \cdot \mathbf{H}$$

$$\mu = (1 + \chi)$$

Magnetismo: il campo magnetico – suscettività e permeabilità magnetica: alcune considerazioni

$$\mu = (1 + \chi)$$
$$\chi = \mu - 1$$

- per il vuoto $\mu = 1$ e $\kappa = 0$
 - per $\mu < 1 \Rightarrow \kappa < 0$
 - per $\mu > 1 \Rightarrow \kappa > 0$
- NB:**
 $\kappa = \chi$
-
- permeabilità assoluta (vuoto) $\mu_0 = 1$ (c.g.s.)
 $= 4\pi \times 10^{-7}$ Henry/m (SI)
 - c.m.b. ha valore medio
di 0.5 gauss (c.g.s.) $\Rightarrow 1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ Tesla (nT)}$
 - il campo magnetizzante (H) si misura in A/m (SI)
e in oersted (in c.g.s.) $\Rightarrow 1 \text{ A/m} = 4\pi \times 10^3 \text{ oe}$

Magnetismo: il campo magnetico – legge di Biot-Savart

Il campo magnetico creato da un conduttore rettilineo percorso da corrente ha un'intensità proporzionale alla corrente ed inversamente proporzionale alla distanza dal filo.

p.es. il campo (H) prodotto da un filo percorso da corrente di intensità=1,3 mA a 3 cm di distanza è pari a 8,19 nT

F=H può essere derivato
dalla legge di Biot e Savart 
"il campo al centro di un conduttore a cappio nel
quale circola una corrente I" è

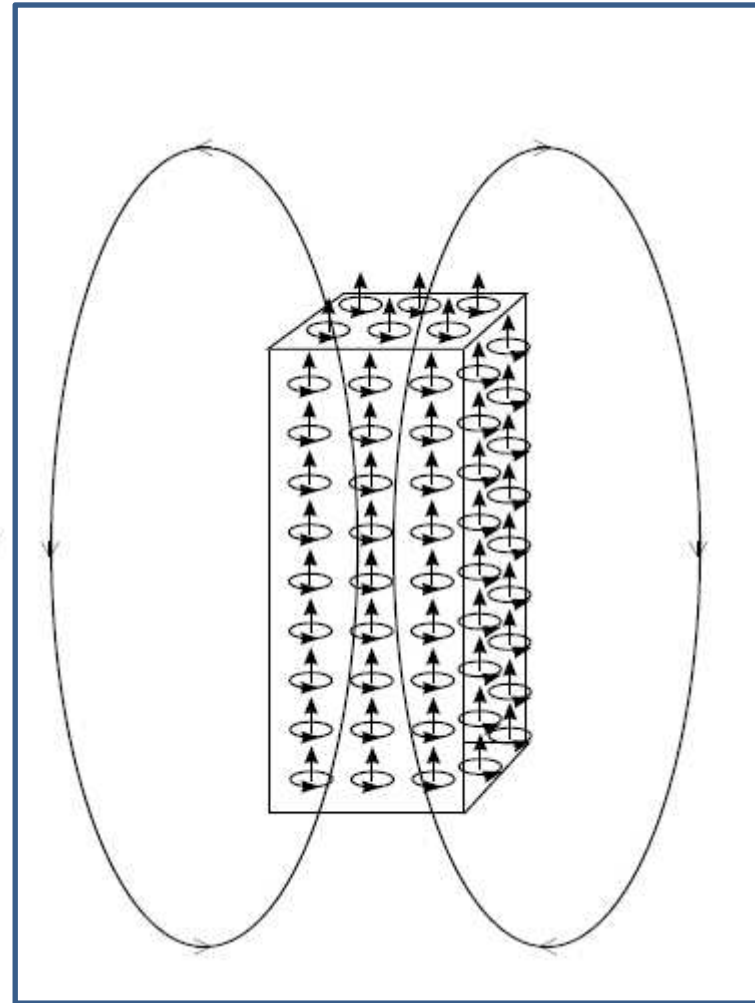
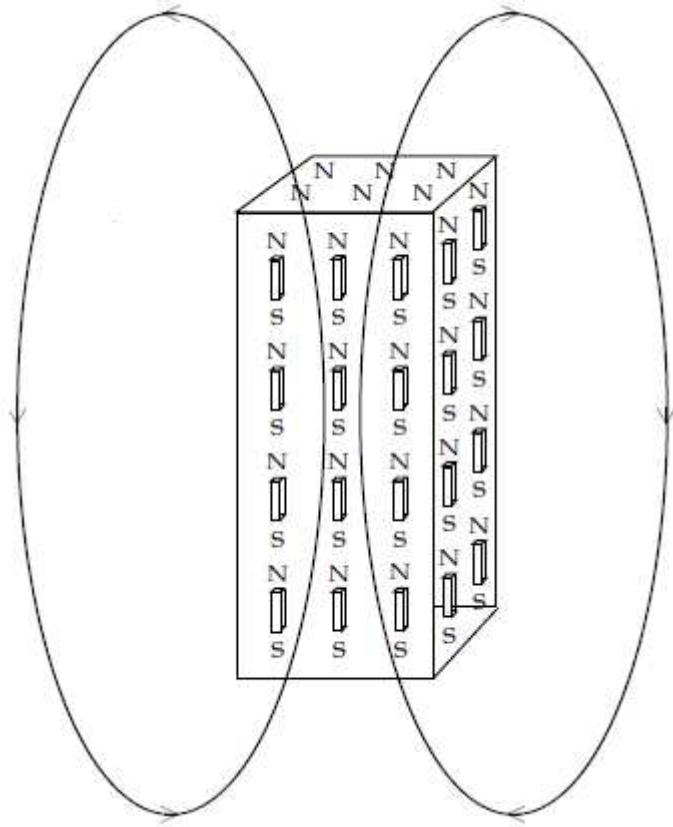
$$H(r) = \frac{(1=\mu_0) \cdot I}{2\pi r} \quad \text{nT}$$

? perché un magnete possiede un campo di forza?

- questo campo è associato a I che circola
all'interno della struttura atomica dei materiali

Magnetismo: equivalenza con la legge di Ampere

Campo magnetico indotto



campo magnetico prodotto da
circolazione di corrente elettrica

Magnetismo: il campo magnetico – legge di Biot-Savart

- questo campo è associato a I che circola all'interno della struttura atomica dei materiali

rotazione orbitale



rotazione intorno all'asse



anche i protoni hanno lo stesso comportamento

protoni ed elettroni: dotati di Momento angolare 'lo spin'

E Momento magnetico

Sono particelle cariche 'rotanti' quindi si comportano come delle calamite

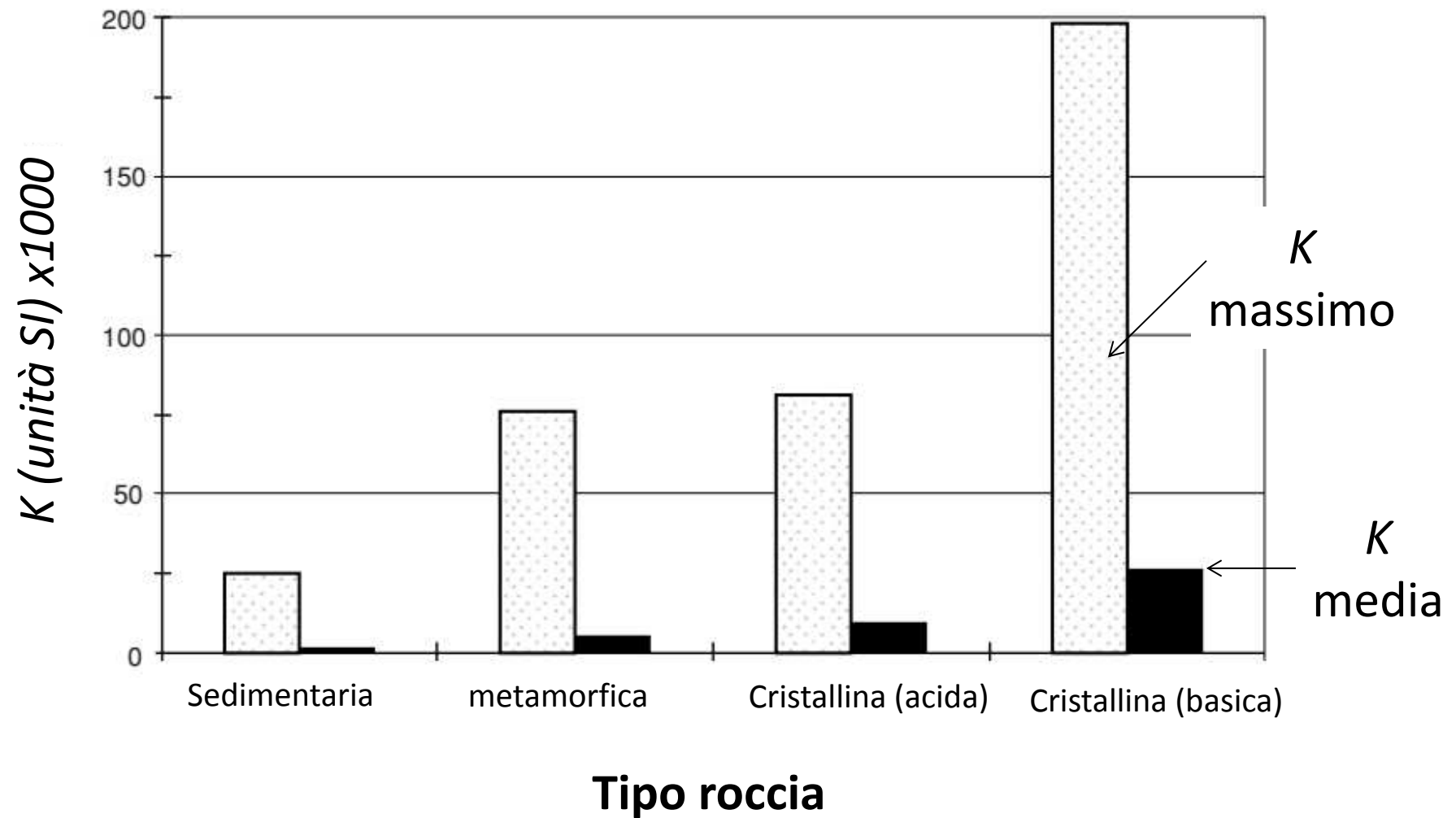
Alcuni minerali che conosciamo che possono acquisire e ritenere la magnetizzazione:

- magnetite Fe_3O_4
- ilmenite FeTiO_3
- pirotite Fe_{1-x}S

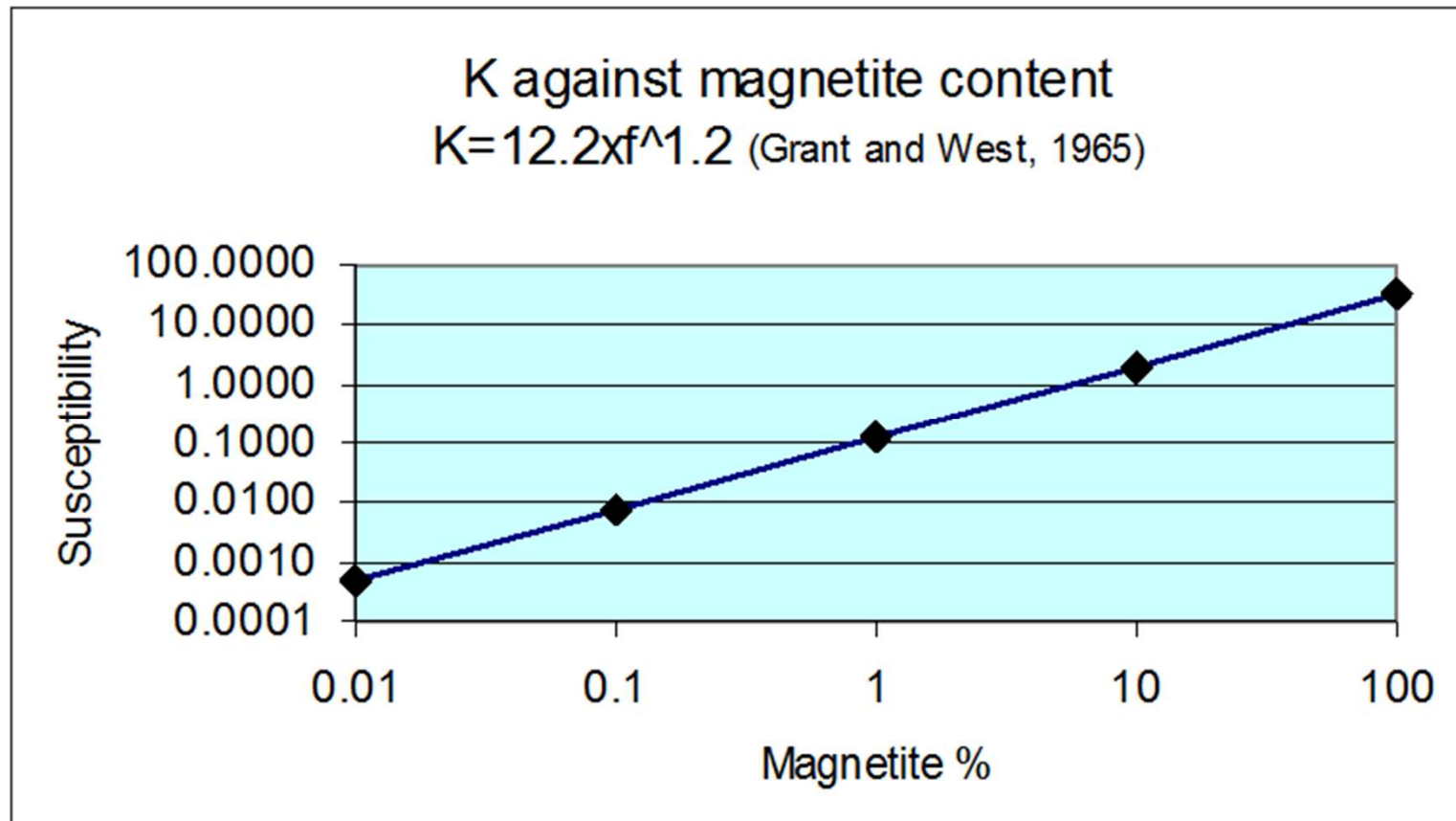
Magnetismo: principali minerali magnetici presenti nelle rocce e di interesse per la Geofisica Applicata

- **La Magnetite**
- **L'Ematite**
- **La Maghemite**
- **La Goethite**
- **La Pirrotina**
- **La Greigite**
- **Ilmenite**

Riassunto I parte: *k* valori in unità SI



Magnetismo: relazione tra suscettività e contenuto di magnetite (%)



Riassunto I parte:

χ o k - demagnetizzazione

In certe situazioni, $k > 1$, la forma dei grani può risultare nel così detto «effetto di demagnetizzazione»,

$(\chi_a)K_a$ _apparente

$$(\chi_a)K_a = \frac{k_t}{1 + nk_t}$$

che causa una riduzione della intensità di magnetizzazione

nk : fattore di demagnetizzazione

n : $0-4\pi$

$n = 0$ (se i granuli sono orientati paralle. a $\mathbf{F}$)

$n = 4/3 \pi$ (gran. sferiforme)

$n = \pi$ (gran. a forma di disco)

Q

indicazioni geodinamiche Magnetizzazione (I_{indotta} e I_r)

$$Q = \frac{I_r}{I(= k \cdot H)}$$

Q

Rapporto di Königsberger

Q (circa 1)

Rocce ignee

Rocce metamorfiche

> in aree continentali

Q (circa) 10

Rocce vulcaniche

Q (circa) 30-50:

Rocce basaltiche (raff.

Veloce)

Q < 1:

Rocce sedimentarie

Rocce metamorfiche

prive di Fe

Magnetismo: proprietà magnetiche dei materiali

- (a) Diamagnetiche ($K=\chi \leq 0$)
- (b) Paramagnetiche ($K=\chi > 0$)
- (c) Ferromagnetiche ($K=\chi \gg 0$)
- (d) Ferrimagnetiche ($K=\chi \gg 0$)

valori di suscettività $K=\chi$ validi se la Temperatura è $< T_c$ di Curie

- (e) Antiferromagnetiche ($K=\chi \gg 0$)

valori di suscettività $K=\chi$ validi se la Temperatura è $< T_N$ di Neel
Che è pari a 680°C

Magnetismo: proprietà magnetiche dei materiali

Sostanze diamagnetiche ($\chi \ll 0$):

- Scoperte da Faraday (1846)
- in assenza di $\mathbf{H} \Rightarrow \mathbf{I}=0$ ovvero nessun campo indotto ($\mathbf{B}$)
- in presenza di $\mathbf{H} \Rightarrow \mathbf{I} \neq 0$ ma molto molto debole
- La magnetizzazione indotta ha direzioni opposte
- Suscettività assoluta $\ll 0$, con valori $< 10^{-4} - 10^{-5}$ (c.g.s.)
- Esempi: la grafite, il gesso, il salgemma, oro, rame, argento

Magnetismo: proprietà magnetiche dei materiali

Sostanze paramagnetiche ($\chi > 0$):

- in assenza di $\mathbf{H} \Rightarrow \mathbf{M} = 0$; i dipoli sono orientati in maniera casuale
- in presenza di $\mathbf{H} \Rightarrow$ il $\mathbf{M}$ cresce in proporzione all'intensità del campo esterno
- Suscettività > 0 , con valori $10^{-3} - 10^{-4}$ (c.g.s.)
- Esempi: stagno, platino, biotite, olivina, anfiboli, pirosseni cioè gran parte dei minerali presenti in natura sono paramagnetici.

Magnetismo: proprietà magnetiche dei minerali:

Esempi di minerali dia-paramagnetici in funzione della presenza o meno del Fe:

Silicati:

- Paramagnetici (ricchi di Fe)
- Diamagnetici (privi di Fe)

Esempi: feldspati, muscovite , leucite

Magnetismo: proprietà magnetiche dei materiali

Sostanze ferromagnetiche ($\chi \gg 0$):

- in assenza di $\mathbf{H} \Rightarrow \mathbf{M} \neq 0$; loro dipoli interagiscono organizzandosi in volumetti detti domini di Weiss
- in presenza di $\mathbf{H} \Rightarrow$ il $\mathbf{M}$ è $\gg$ e la magnetizzazione è irreversibile,
- Suscettività $\gg 0$, con valori $10^{-4} - 4$ (c.g.s.)
- Alla $T > T_{\text{curie}}$ si comportano come materiale paramagnetico,
- Esempi: Fe, Co, Ni, alcune leghe
- Il minerale principale è la magnetite

Magnetismo: proprietà magnetiche dei minerali:

I minerali ferromagnetici che concorrono alla magnetizzazione delle rocce:

Ossidi: **gruppo ferro-titanio-ossigeno**

- di ferrimagnetici dispersi in piccoli quantità
(FeO, Fe₂O₃, TiO₂, MnO, Al₂O₃)

solfuri: **gruppo ferro-zolfo**

- di ferro (FeS) pirottina
- Monosolfuro di ferro (meteoriti)
- Pirite e marcasite
- Solfuri senza ferro => 'diamagnetici' p.e. galena

Silicati:

- Paramagnetici (ricchi di Fe)
- Diamagnetici (privi di Fe)

Esempi: feldspati, muscovite, leucite

Magnetismo: proprietà magnetiche dei materiali



Sostanze ferromagnetiche ($\chi \gg 0$):

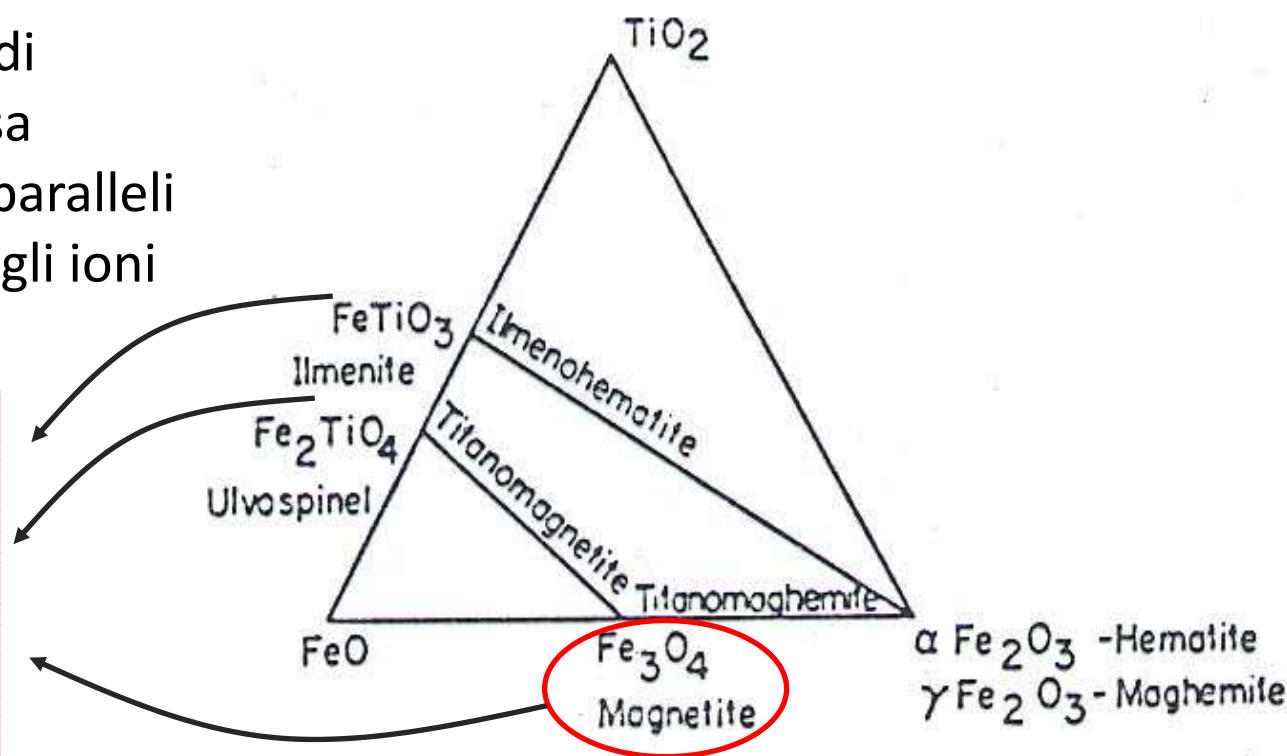
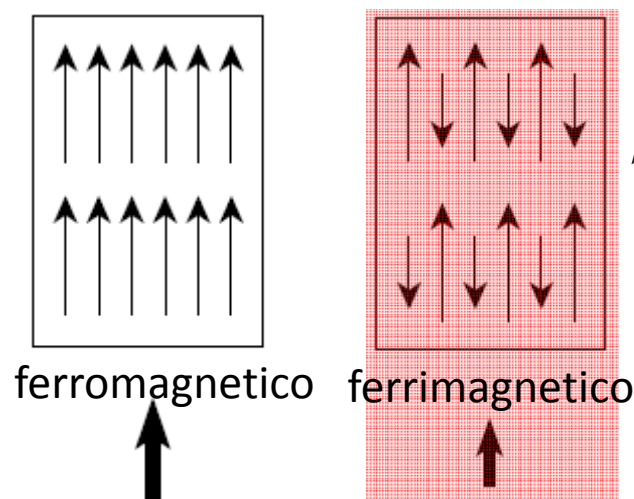
ferrimagnetiche

- Il caso della magnetite (Fe_3O_4)



Considerazioni: energia di allineamento è complessa

- Fe^{3+} : gli spin sono antiparalleli in opposizione contro gli ioni bivalenti (Fe^{2+})



triangolo delle fasi dei minerali della famiglia Fe-Ti
((ossido di ferro – ossido di titanio))

Magnetismo: proprietà magnetiche dei materiali

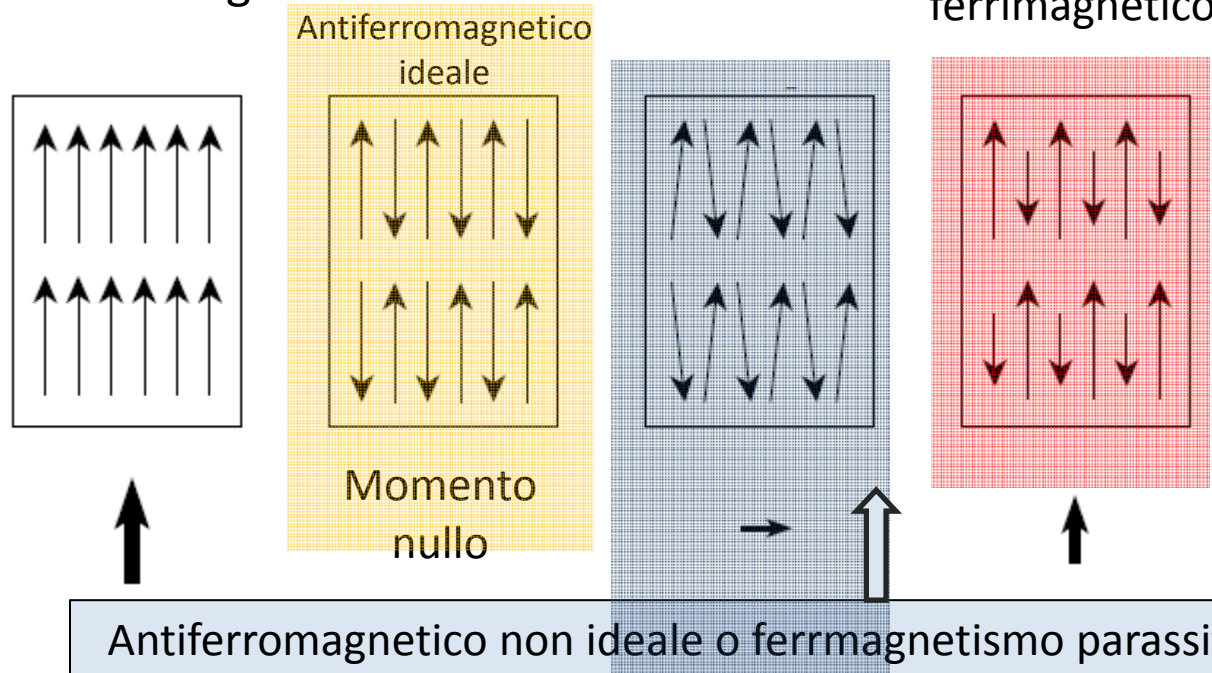
Sostanze ferromagnetiche ($\chi \gg 0$):

antiferromagnetiche

- Il caso della magnetite (Fe_3O_4)



- Orientamento antiparallelo al campo inducente (ioni di Fe^{3+} nel dominio di Weiss),
- Tipico comportamento dell'ematite,
- Il momento magnetico è nullo.



Magnetismo: il campo magnetico – effetto presenza di un campo magnetico esterno sui dipoli magnetici

(a) 

(b) 

(c) 

(d) 

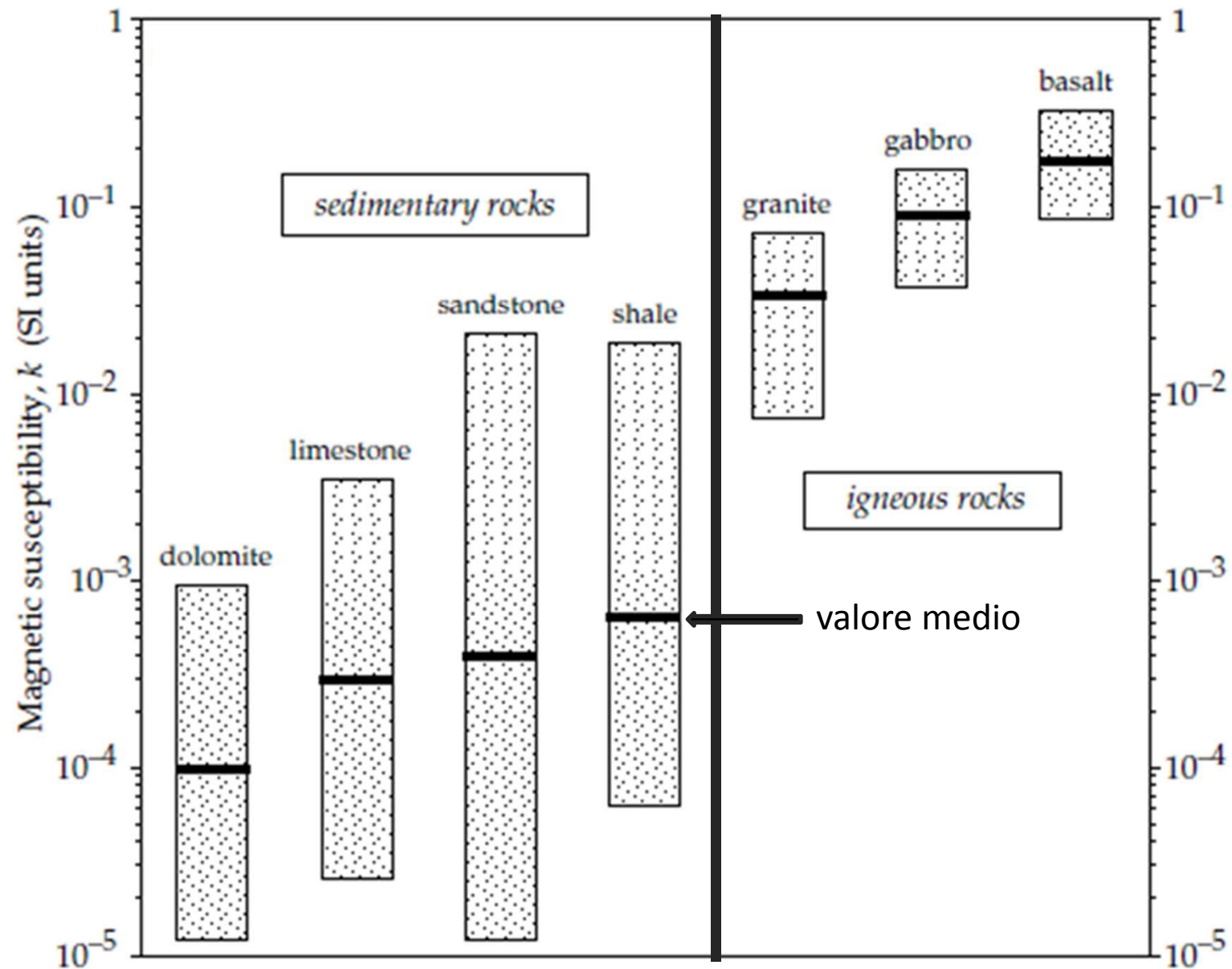
(-) dipoli magnetici orientati in modo opposto (**diamagnetici**)

- a. sono orientati in modo casuale (**paramagnetismo**) (*dipendente dalla temperatura*) (dipoli magnetici isolati e non interagenti)
- b. interagendo tra loro, sono totalmente allineati parallelamente (**ferromagnetismo**) (magnetismo cooperativo)
- c. interagendo tra loro, sono totalmente allineati antiparallelamente (**antiferromagnetismo**)
- d. interagendo tra loro, sono allineati antiparallelamente con un momento risultante non nullo (**ferrimagnetismo**)

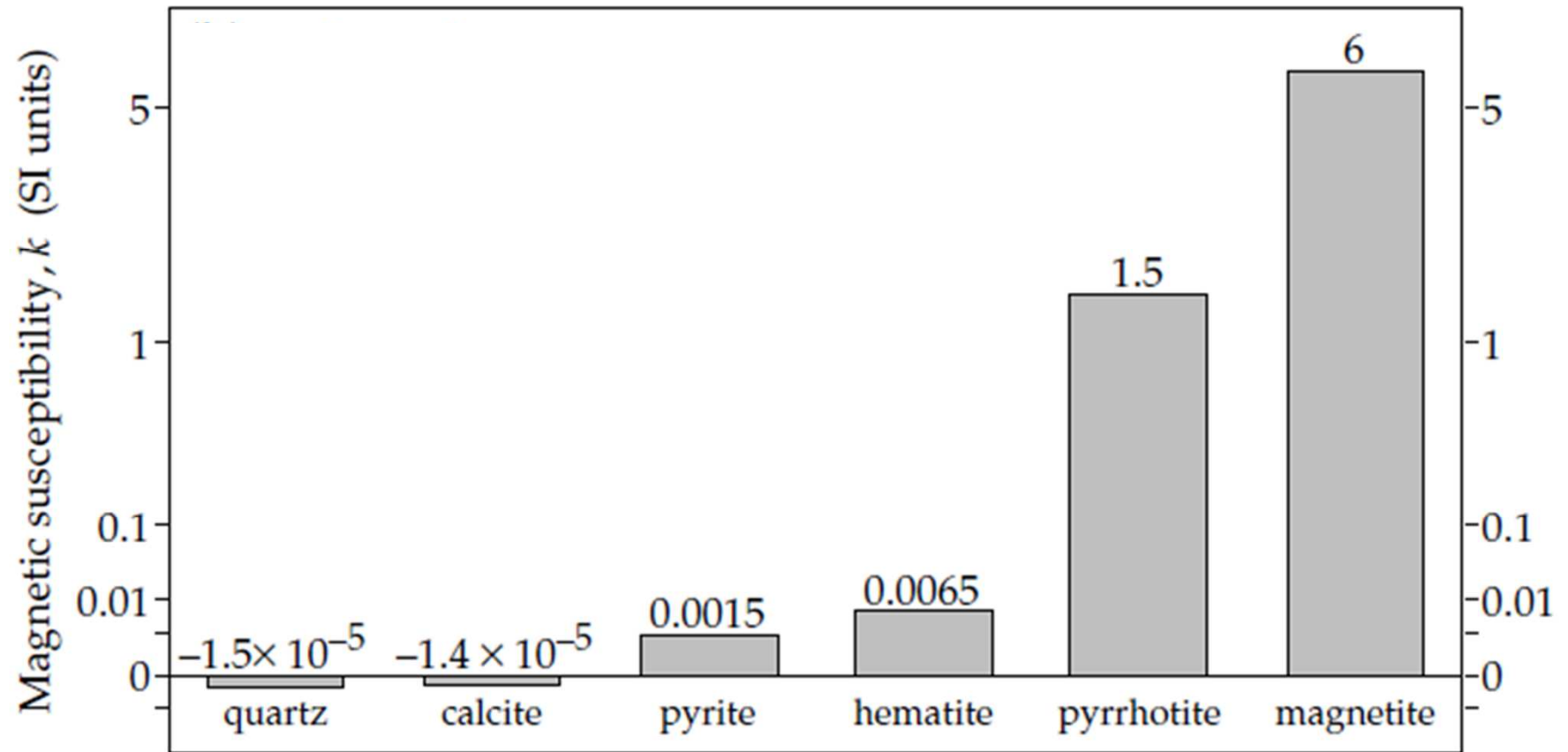
Magnetismo: principali minerali magnetici presenti nelle rocce e di interesse per la Geofisica Applicata

- **La Magnetite**
- **L'Ematite**
- **La Maghemite**
- **La Goethite**
- **La Pirrotina**
- **La Greigite**
- **Ilmenite**

Magnetismo: valori di χ (o K): rocce



Magnetismo: valori di χ (o K): minerali



Magnetismo: proprietà magnetiche – Temperatura di Curie(Tc)

Temperatura TC che, in un materiale magnetico, segna il passaggio da uno stato ferro- o ferri-magnetico (ordinato, con magnetizzazione spontanea, a temperatura minore di TC) a uno stato paramagnetico (disordinato, a temperatura maggiore di TC).

La Temp. di curie è diversa per ogni tipo di minerale o serie di famiglie di minerali:

- Titano-magnetite: 463°C – 580°C
- Ilmenite – ematite: 130°C – 220°C
- Cromite: -185°C

La Temp. di Neél:

È la temperatura equivalente alla Tc per i minerali antiferromagnetici, cioè la temperatura al di sopra della quale un materiale antiferromagnetico diventa paramagnetico

- Ematite: 680°C
- Ilmenite: -216°C

Magnetismo: : magnetizzazione residua – processi e significato

La magnetizzazione residua ‘naturale’ o primaria:

è causata dalla presenza di materiali ferrimagnetici dispersi al momento della formazione della roccia,

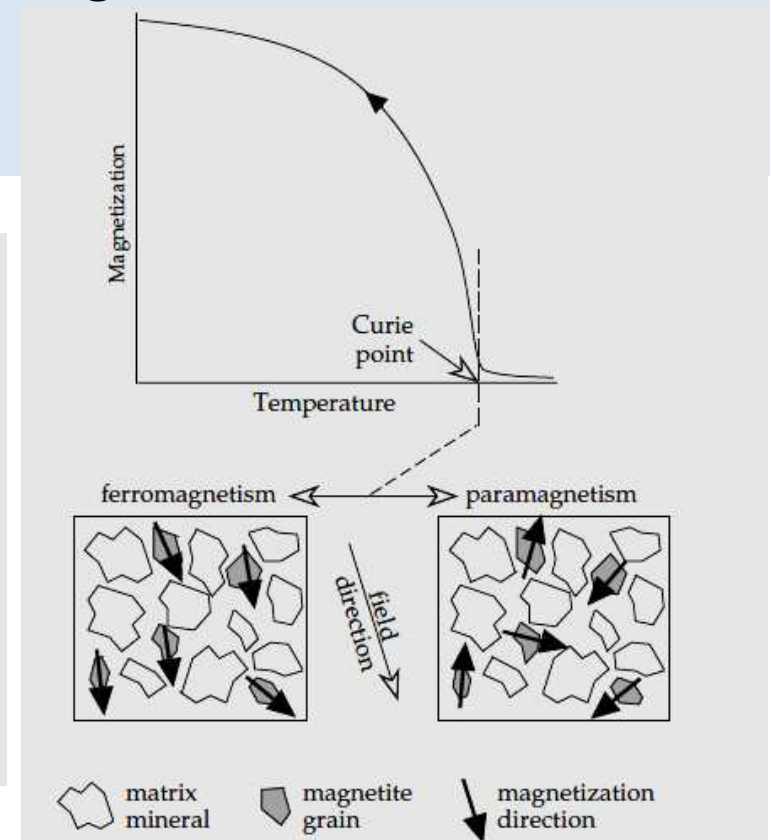
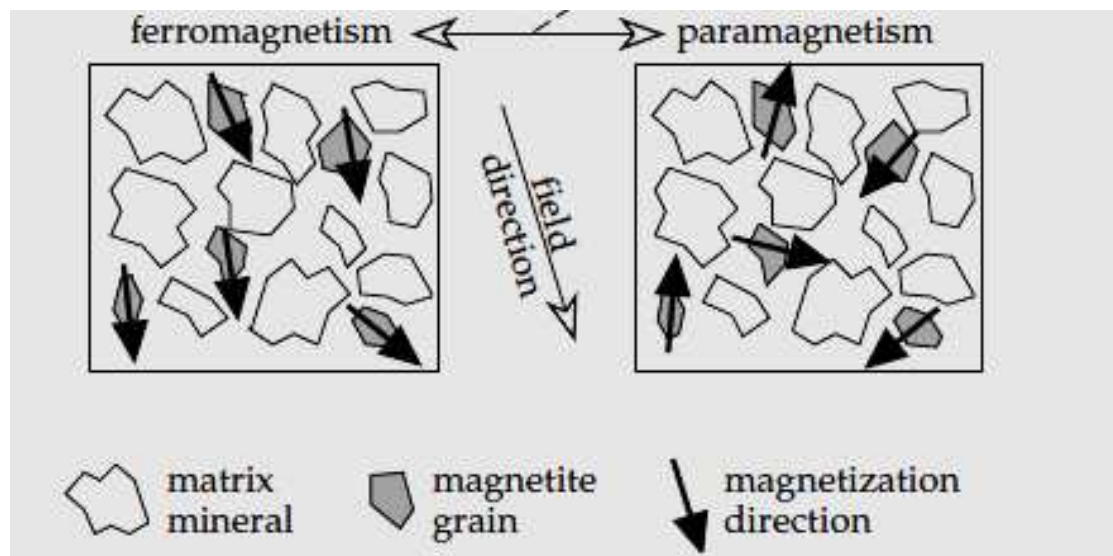
- (1) Termorimane (TRM)
- (2) Detritica (DRM)

Se la magnetizzazione residua è stata acquisita in fase successiva alla sua formazione allora si chiama ‘secondaria’

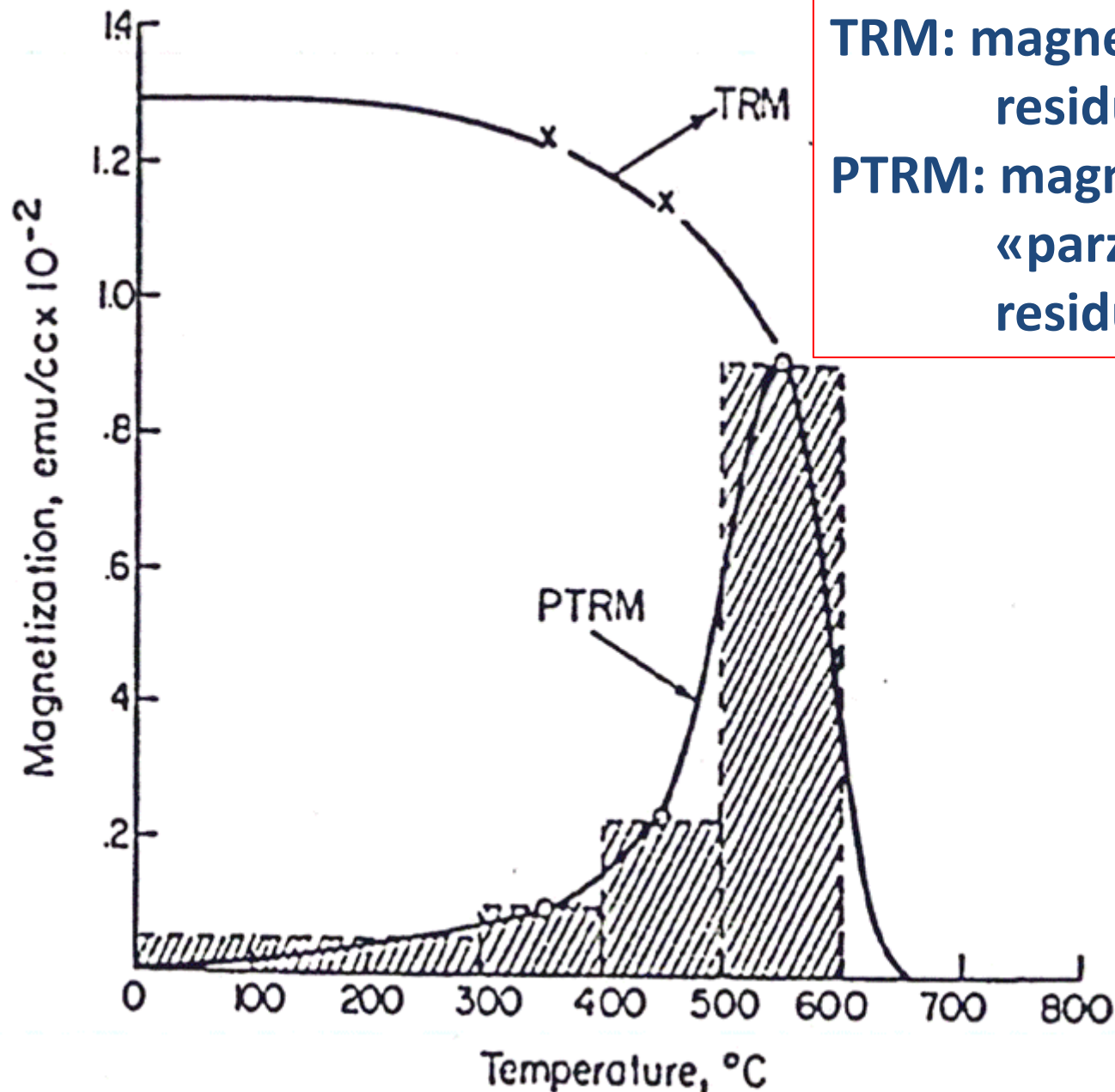
- (1) Isoterma (IRM)
- (2) Chimica (CRM)
- (3) Viscosa (VRM)
- (4) Piezoresidua (PRM)

Magnetismo: magnetizzazione residua: Termorimanente (TRM)

- Minerali ferromagnetici
- Molto intensa e stabile
- Inizia al punto di Curie e continua per una decina di gradi sotto
- Consente la determinazione della direzione del c.m.t. e qualche volta anche l'intensità (è interessante per gli studi del paleomagnetismo)
- Esempio: basalto, colate laviche



Magnetismo: magnetizzazione «TRM» – paleomagnetismo

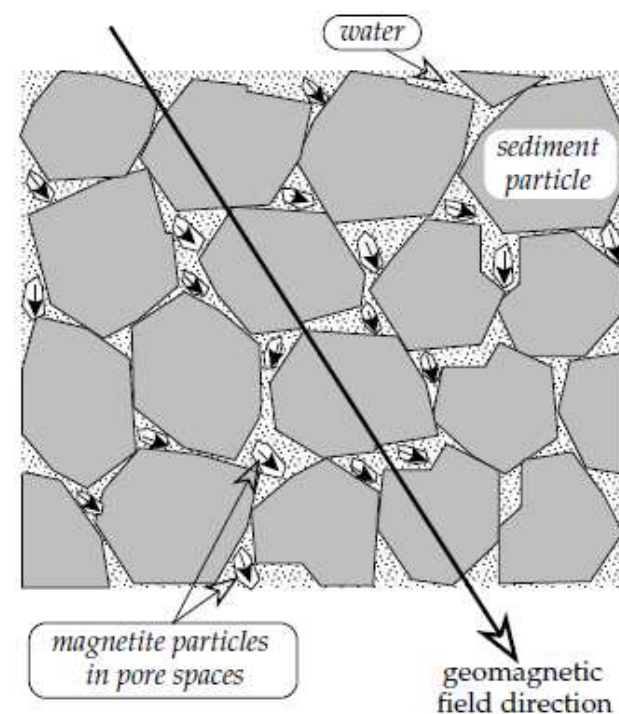
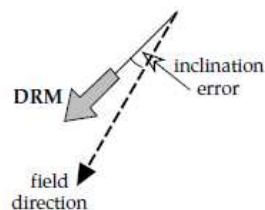
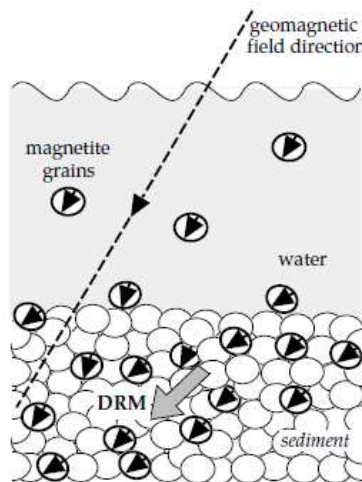


**TRM: magnetizzazione termo
residua**

**PTRM: magnetizzazione
«parziale» termo
residua**

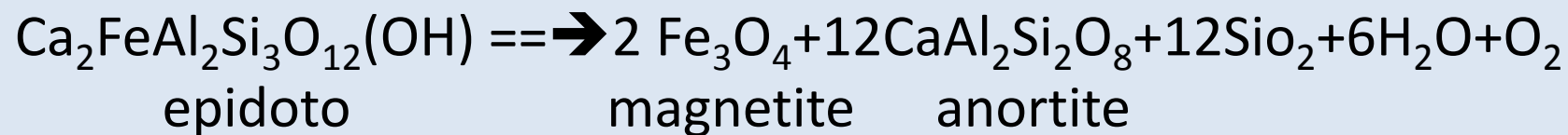
Magnetismo: magnetizzazione residua: detritica (DRM)

- Sedimentazione delle particelle ferrimagnetiche sotto l'azione del c.m.t. dell'epoca,
- È importante per studi di paleomagnetismo,
- Limitazioni: errore del 22°- 30° nella determinazione dell'inclinazione (i). Confrontare direzione momenti dipoli piccoli rispetto alla del c.m. ipotizzato



Magnetismo: magnetizzazione residua: Chimico (o di cristallizzazione) residua (CRM)

- Trasformazione **chimica** 'sostituzione' di alcuni elementi,
- Esempio: acqua sotterranea ricca di Fe che attraversa rocce sedimentarie (idrossidi di Fe),
- Anche i processi di **metamorfismo** a temperature $< T_c$
- Esempio: formazione di magnetite



Magnetismo: magnetizzazione residua: Viscoresidua (VRM)

- Viene acquisita dalla roccia stando per lunghi tempi sotto l'effetto di un c.m. debole a condizione che:
 - Temperatura e
 - processi di alterazione siano esclusi
- Esempio: campioni portati in lab. E lasciati per lungo tempo possono acquisire questo tipo di mag. residua

Magnetismo: magnetizzazione residua: Isoterma (IRM)

- Viene acquisita dalla roccia sotto l'effetto di c.m.t. molto forte,
- Esempio: il caso dei fulmini,
dove **H** locale può raggiungere 100 Oe
c.m.t. vale circa 0,5 Oe

Magnetismo: magnetizzazione residua: Auto-inversione o Piezoresidua (PRM)

- In presenza di reticoli cristallini di sostanze ferrimagnetiche,
- con orientazione dei dipoli di weiss in direzione antiparallela
- La temperatura controlla la prevalenza di una direzione rispetto all'altra
- Esempio: Pomice (Giappone)



Magnetismo: il campo magnetico - dipolare

Il c.m.t. è un campo vettoriale variabile nel tempo e nello spazio e la sua rappresentazione è fatta istante per istante tramite un VETTORE che si indica di solito con **F.**

- È generato da un dipolo posto al centro della terra
- Asse del dipolo forma un angolo di circa $11,5^\circ$ con l'asse di rotazione terrestre
- Quest'asse è variabile nel tempo



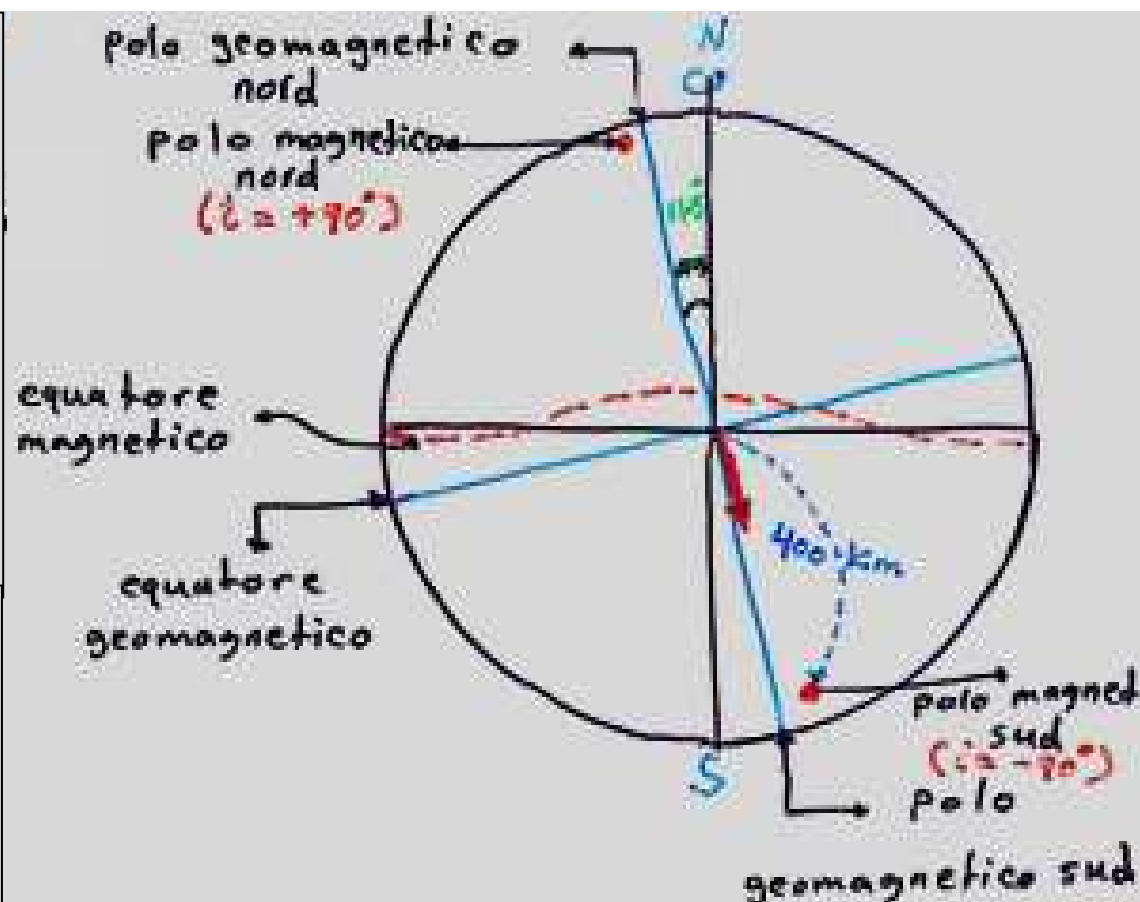
Magnetismo: il campo magnetico - dipolare

**polo Geomagnetico nord:
Lat. 78.5°N, Long. 70°W
(Groenlandia)**

**polo Geomagnetico sud:
Lat. 78.5°S, 110°E
(Antartide)**

polo magnetico nord:
Lat. 75°N, 101°W

polo magnetico sud:
Lat. 67°N, 143°E



Intensità del campo magnetico:

ai poli compo. Verticale: ($Z=70 \cdot 10^3$ nT o gamma)

all'equatore compo. Orizzontale: ($H=30 \cdot 10^3$ nT o gamma)

metodi magnetici
Fine parte 02