Ciao Maccio ♡ oggi dobbiamo fare fisica e c'è tanto caldo!

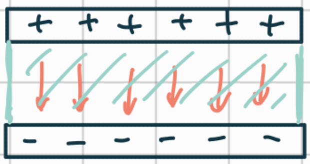
Ai noi!

FISICA 2 - 06/04/22

MAGNETISMO NELLA MATERIA

Gli elettroni hanno un momento intrinseco (spin) che produce un momento di dipolo magnetico

Cosa succedeva ai dielettrici?



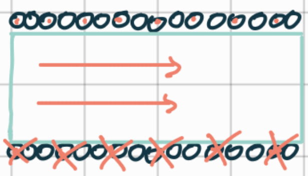
20.1

Il campo elettrico efficace misurato nel dielettrico tra le piastre è

$$E_K = \frac{E_0}{K} = \frac{\sigma}{K\varepsilon_0}$$

dove $K>1$ è la costante dielettrica relativa e $\varepsilon = K\varepsilon_0$ la costante dielettrica relativa.

Nel caso del magnetismo, consideriamo un generatore di campo magnetico costante come il solenoide. Inseriamo un cilindro di un certo materiale: qual è il campo magnetico in relazione a quello del solenoide nel vuoto?



20.2

$$\boxed{B_{K_m} = K_m B = K_m \mu_0 n i = \mu n i}$$

dove K_m è la COSTANTE DI PERMEABILITÀ RELATIVA e $\mu = K_m \mu_0$ è la PERMEABILITÀ MAGNETICA ASSOLUTA

OSS: Nel dielettrico $K>1$, cioè il campo elettrico è sempre ridotto inserendo un materiale tra le piastre.

Nel caso magnetico K_m può essere anche <1. Infatti
specifico classificheremo i materiali in base al loro valore di K_m

- $K_m < 1$ DIAMAGNETISMO $B_{tc} < B_0$ (diminuiscono il campo magnetico)
- $K_m > 1$ PARAMAGNETI $B_{tc} > B_0$ (aumentano il campo magnetico)
- $K_m >> 1$ FERROMAGNETI $(\sim 10^5)$

In realtà non ha molto senso definirlo in quest'ultimo caso dato che non è costante e varia abbastanza parecchio a seconda di come viene magnetizzato. Li studieremo meglio dopo.

Definito $\chi_m = K_m - 1$ la SUSCETTIVITÀ MAGNETICA
(χ_m non è costante e dip. dalla temperatura e alla densità, $\chi_m \propto \frac{\rho}{T}$ PRIMA LEGGE DI CURIE

ES:

DIAMAGNETI ($\chi_m < 0$)		PARAMAGNETI ($\chi_m > 0$)	
ARGENTO	$-2,39 \times 10^{-5}$	ALLUMINIO	$2,08 \times 10^{-5}$
ORO	$-3,46 \times 10^{-5}$	PLATINO	$2,791 \times 10^{-5}$
RAME	$-0,98 \times 10^{-5}$	URANIO	$40,92 \cdot 10^{-5}$

"Possiamo vedere un effetto maggiore con l'Uranio... che però ha altri problemi"

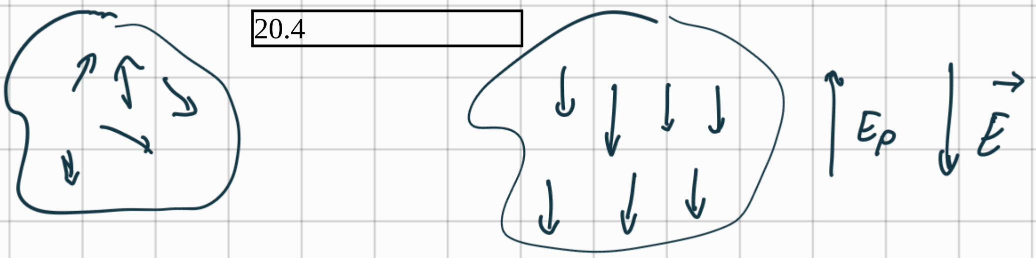
Avevamo visto che nel dielettrico si genera una polarizzazione elettronica che genera un campo elettrico contrapposto.

Se consideriamo l'elettrone come una nube di elettroni:
il nucleo positivo si sposta (SEPARAZIONE ATOMICA) creando un momento di dipolo concorde al campo elettrico (POLARIZZAZIONE ELETTRONICA

20.3

In alcune molecole, invece, c'è già una certa polarizzazione naturale, ma se immerso in un campo elettrico questi dipoli sparsi si allineano e creano un campo elettrico opposto.

20.4



In entrambi i casi i campi elettrici sono opposti.

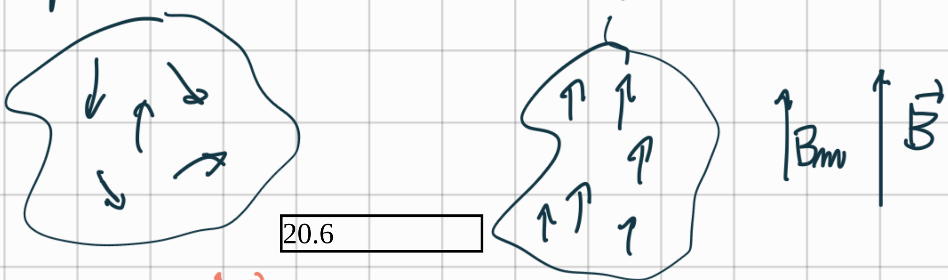
Nel campo magnetico non succede così: la MAGNETIZZAZIONE ATOMICA fa sì che il momento magnetico che si crea è opposto al campo magnetico

→ DIAMAGNETISMO

20.5

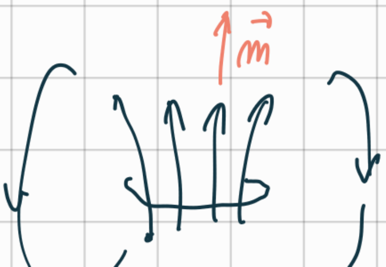
Non possiamo spiegarlo in modo quantitativo nel modello classico (potremmo immaginare l'atomo come un pianeta ecc...) ma abbiamo aspettare la quantistica alla base.

Invece, se abbiamo dei dipoli magnetici e dei dipoli sparsi nel materiale, all'accensione del campo magnetico i momenti magnetici si allineano col campo nel suo stesso verso



20.6

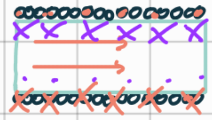
→ PARAMAGNETISMO



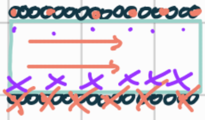
A seconda di quale effetto prevale un materiale sarà diamagnetico o paramagnetico:

Invece che delle cariche di polarizzazione, nel materiale immerso nel campo magnetico si formano delle CORRENTI AMPERIANE, che possono essere

- discordi: DIAMAGNETISMO
- concordi: PARAMAGNETISMO



20.7



20.8

$$B_K = B_0 + (K_m - 1) B_0 = \mu_0 n i + \chi_m \mu_0 n i$$

$i_m = \chi_m i$ è la CORRENTE AMPERIANA

Vogliamo modellizzare le correnti amperiane.

20.9

Consideriamo un volume V con un numero di dipoli magnetici N

$n = \frac{N}{V}$ è la DENSITÀ DI DIPOLI MAGNETICI

Definiamo il dipolo magnetico medio come

$$\langle \vec{m} \rangle = \frac{1}{N} \sum_i \vec{m}_i$$

Allora il VETTORE MAGNETIZZAZIONE è

$$\vec{M} = \frac{\sum_i \vec{m}_i}{V} = \frac{N}{V} \frac{1}{N} \sum_i \vec{m}_i = n \langle \vec{m} \rangle$$

Se non c'è un campo $\vec{B}$ esterno la casualità dei momenti fa sì che

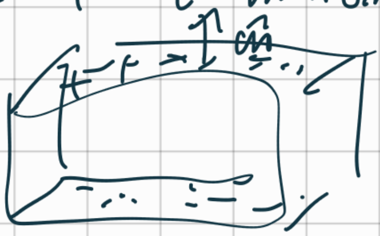
$$\langle \vec{m} \rangle = 0 \Rightarrow \vec{M} = 0$$

Se invece c'è, si allineano e ha senso proseguire lo studio

REMEMBER: Nel dielettrico al posto di un cubetto con tanti dipoli potevamo sostituirlo con un cubetto le cui cariche sono disposte e opposte su facce opposte, creare un unico dipolo di valore $\vec{p}$

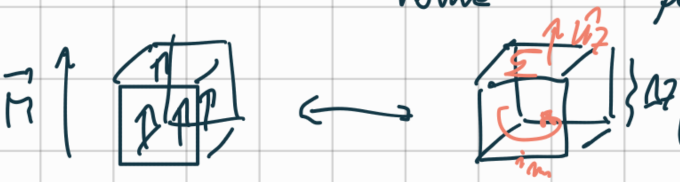
20.10

Se $\vec{P}$ è uniforme rimangono solo le facce esterne



20.11

Nel magnetismo possiamo sostituire il cubetto con una spira tale che c'è un flusso di corrente i_m che genera un momento di dipolo magnetico per unità di volume pari al valore $\vec{M}$ del cubetto



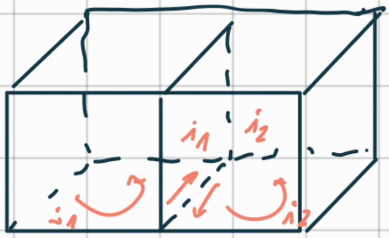
20.12

Il momento magnetico della spira è $\vec{m} = i_m \Sigma \hat{u}_z$

$$\Rightarrow \vec{M} = \frac{\vec{m}}{V} = \frac{i_m \cancel{\Sigma} \hat{u}_z}{\cancel{\Sigma} \Delta z}$$

La corrente che devo fornire è $\boxed{i_m = |\vec{M}| \Delta z}$

Se $\vec{M}$ è uniforme; considerati tanti cubetti, sulle facce esterne si danno correnti che scorrono



20.13

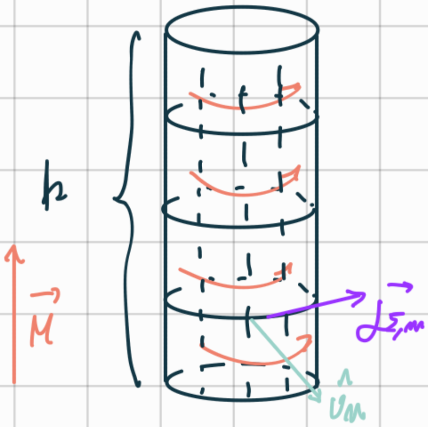
Se $\vec{M}$ è uniforme

$$i_1 = i_2$$

ma di verso opposto: le correnti sulle facce comuni si cancellano

Quindi, se $\vec{M}$ è uniforme le uniche correnti non bilanciate sono sulla superficie. Allora, complessivamente la corrente amperiana è

20.14



$$di_m = |\vec{M}|\, dz$$

$$\boxed{i_m = \int_0^h |\vec{M}|\, dz = |\vec{M}|\, h}$$

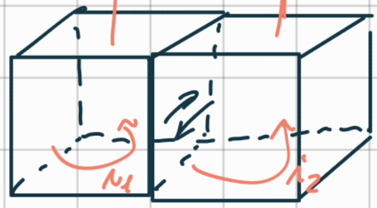
Si può anche definire una DENSITÀ SUPERFICIALE DI CORRENTE

$$\boxed{\vec{J}_{\Sigma,m} = \vec{M} \times \hat{u}_n}$$

È totalmente duale al dielettrico!

IL CASO NON UNIFORME

Supponiamo che $\vec{M}$ non sia costante.

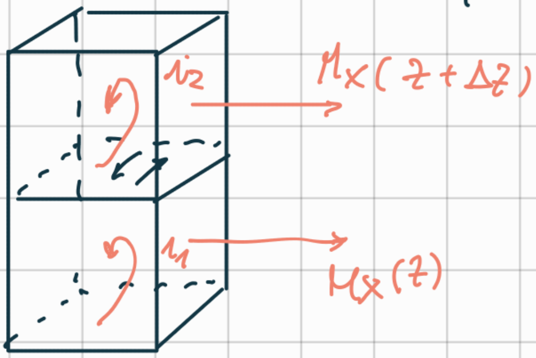


20.15

Allora il contributo del cubetto è

$$i_y^{(1)} = i_1 - i_2 = \left(M_z(x) - M_z(x+\Delta x)\right)\Delta z$$
$$= -\frac{\partial M}{\partial x}\, dx\, dz$$

Ma non è l'unico contributo possibile, ne ho uno corrente lungo y dato dalla corrente sopra:



20.16

$$i_y^{(2)} = i_2 - i_1 = \left(M_x(z+\Delta z) - M_x(z)\right)\Delta x$$
$$= -\frac{\partial M_x}{\partial z}\, dx\, dz$$

Allora $i_y = i_y^{(1)} + i_y^{(2)} = \left(\frac{\partial M_x}{\partial z} - \frac{\partial M_z}{\partial x}\right) dx\, dz$.

$$\Rightarrow J_y = \frac{i_y}{dx\, dz} = \frac{\partial M_x}{\partial z} - \frac{\partial M_z}{\partial x}$$

Riapplicando il ragionamento anche nelle altre direzioni si ottiene

$$\boxed{\vec{J}_m = \vec{\nabla} \times \vec{M}}$$

Se $\vec{M}$ è costante: correnti solo esterne

" NON è costante: correnti anche interne.

LEGGI DI MAXWELL NEI MATERIALI

LEGGE DI AMPÈRE: $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \vec{J}_m\right)$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \vec{\nabla} \times \vec{M}$$

$$\vec{\nabla} \times \underbrace{\left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right)}_{\vec{H}} = \vec{J}$$

$$\Rightarrow \boxed{\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}}$$

Gioia

Quando inseriamo un diamagnete o un paramagnetico ciò che andiamo a modificare è $\vec{H}$, non direttamente il campo $\vec{B}$.

Tuttavia, questa legge ci basta a dire poco: non sappiamo come varia $\vec{M}$ e $\vec{B}$ tra di loro.

Per determinare $\vec{H}$ e $\vec{B}$ ci serve un'eq. di stato magnetico, come una relazione del tipo

$$\boxed{\vec{M} = \chi_m \vec{H}}$$

(oss: Non è vera per i ferromagnetici)

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{M} + \vec{H}) = \mu_0 (\chi_m + 1) \vec{H} = \mu_0 K_m \vec{H} = \mu \vec{H}$$

$$\Rightarrow \boxed{\vec{B} = \mu \vec{H}}$$

ELETTROSTATICA E MAGNETOSTATICA NEI MATERIALI

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \qquad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \qquad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\varepsilon_0 \vec{E} = \vec{D} - \vec{P} \qquad \frac{\vec{B}}{\mu_0} = \vec{H} + \vec{M}$$

Nel caso lineare

$$\vec{P} = (K-1)\varepsilon_0 \vec{E} \qquad \vec{M} = \frac{K_m - 1}{K_m} \frac{\vec{B}}{\mu_0}$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} = \varepsilon_0 K \vec{E} \qquad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} = \frac{\vec{B}}{K_m \mu_0}$$

$$\Downarrow \qquad \Downarrow$$

$$\boxed{\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}} \qquad \boxed{\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu \vec{J}}$$

Nel caso lineare le leggi rimangono immutate a patto di cambiare ε_0 con ε e μ_0 con μ.

EQ. DI MAXWELL

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \qquad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Nel caso lineare:

$$\vec{P} = (K-1)\varepsilon_0 \vec{E} \qquad \vec{M} = \frac{K_m - 1}{K_m} \frac{\vec{B}}{\mu_0}$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} = \varepsilon_0 K \vec{E} \qquad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} = \frac{\vec{B}}{K_m \mu_0}$$

$$\Downarrow \qquad \Downarrow$$

$$\boxed{\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}} \qquad \boxed{\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu \vec{J} + \varepsilon_\mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}}$$

Oss: Se non so delle relazioni tra i campi vettoriali posso risolvere le equazioni

FENOMENOLOGIA DEI FERROMAGNETI (il NOUMENO non è pervenuto)

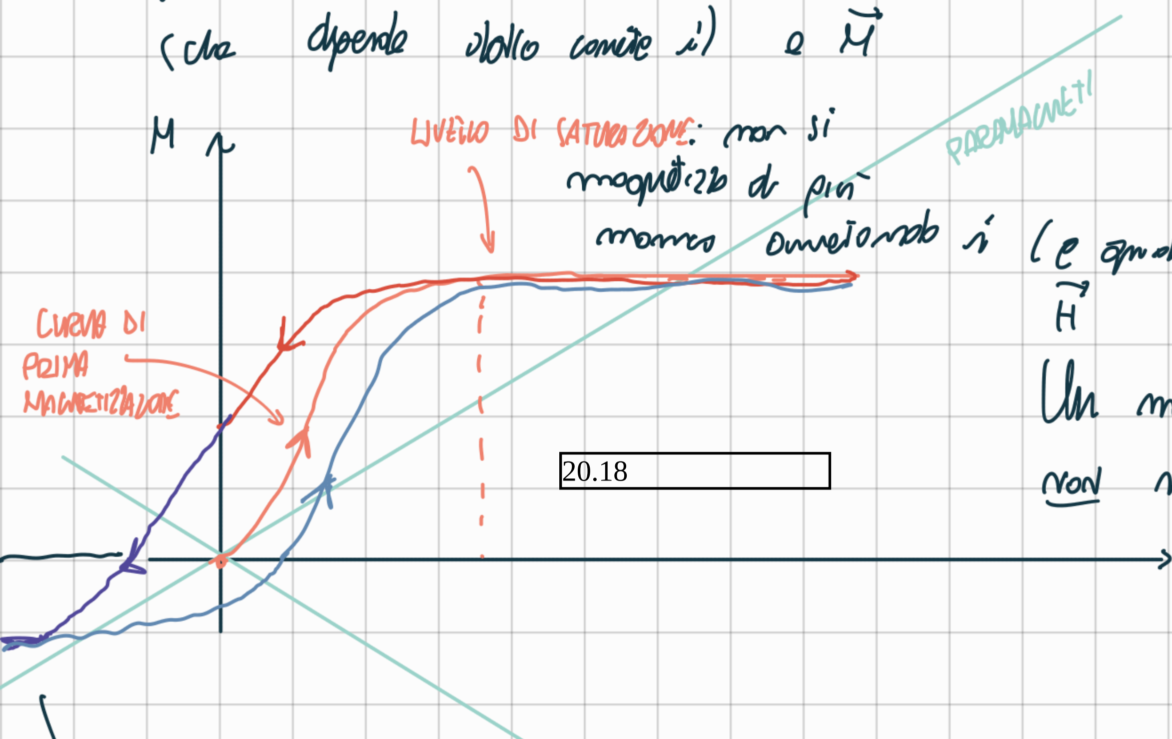
Un ferromagnete presenta le proprietà magnetiche anche a solenoide spento.

20.17

Consideriamo un toro di materiale ferromagnetico avvolto in solenoide.

Voglio studiare la magnetizzazione del materiale.

Se $\vec{M}$ è $\neq 0$ allora il materiale è magnetizzato.
Quello che mi interessa è il CICLO DI ISTERESI tra $\vec{H}$ (che dipende dalla corrente i) e $\vec{M}$



20.18

CASO LINEARE
$\vec{M} = \chi_m \vec{H}$

Un materiale, inizialmente non magnetizzato, rimangono magnetizzati anche se abbasso i e poi lo spengo

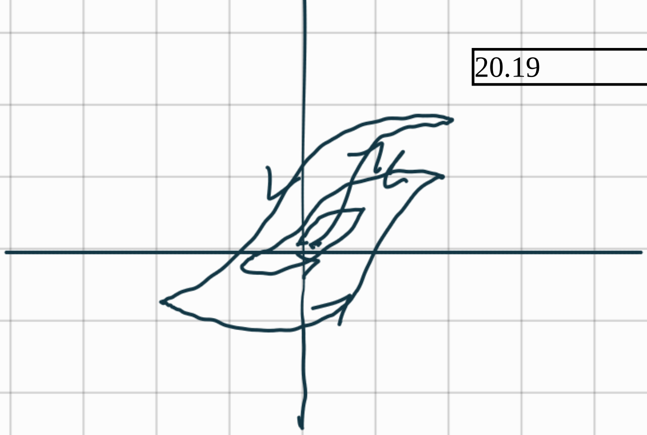
Invertendo la corrente si magnetizza nel verso opposto.

DIAMAGNETI

Se metto la corrente completo il ciclo di isteresi, rimanendo super magnetizzato

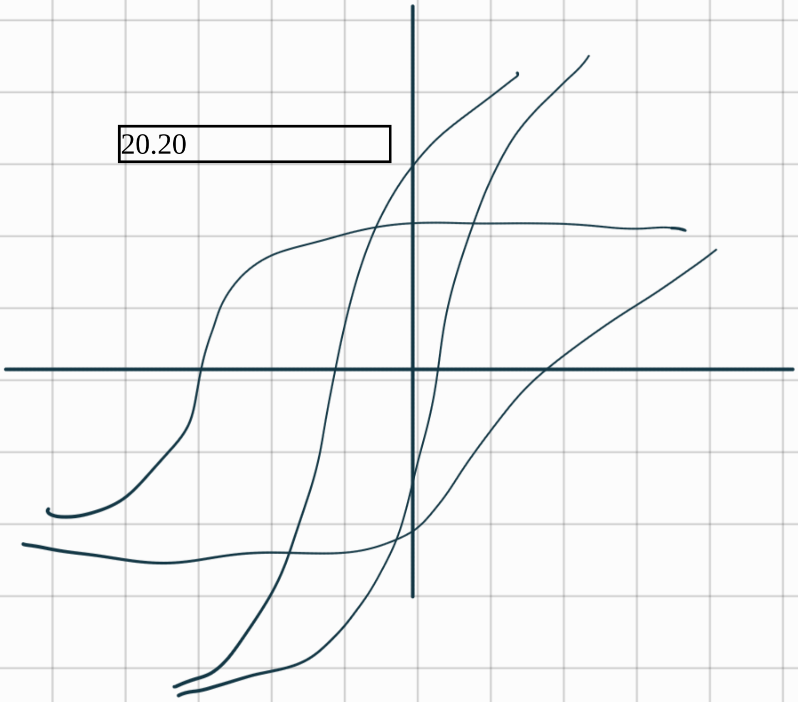
Per smagnetizzarlo devo interrompere la magnetizzazione prima, in modo da avere un ciclo che restringe converge allo zero

20.19



Il ciclo dipende dal materiale

20.20



Inoltre, dipende dalla temperatura: c'è una TEMPERATURA DI CURIE tale per cui un materiale ferromagnetico diventa paramagnetico e viceversa: questa transizione di fase è spiegata quantisticamente, ad esempio, dal modello di Ising?