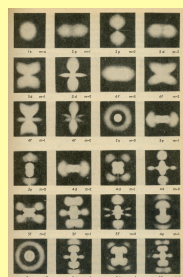
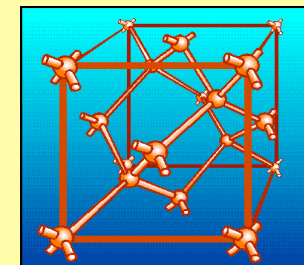
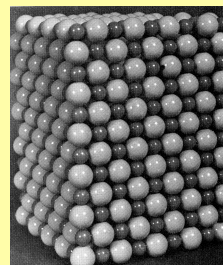


**Le orbite degli elettroni
in atomo di idrogeno**



**Forma spaziale degli Orbitali
elettronici di atomo di idrogeno**

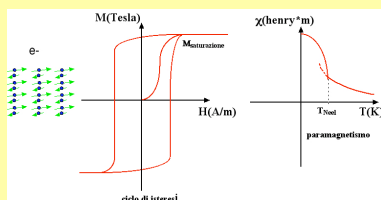


Un solido

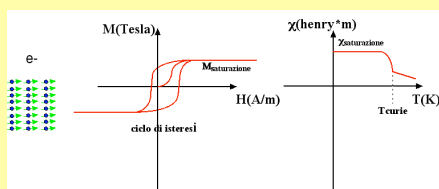
Il magnetismo nella materia

Dr. Daniele Di Gioacchino

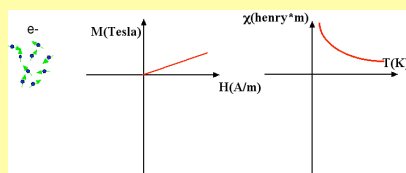
**Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Laboratori Nazionali di Frascati**



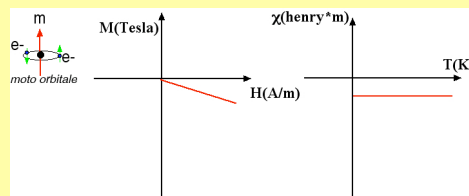
ferrimagnetismo



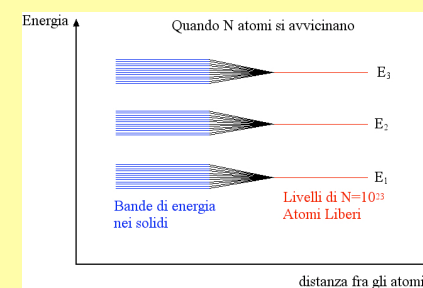
ferromagnetismo



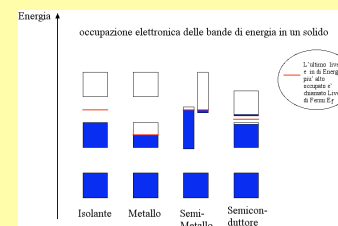
paramagnetismo



diamagnetismo



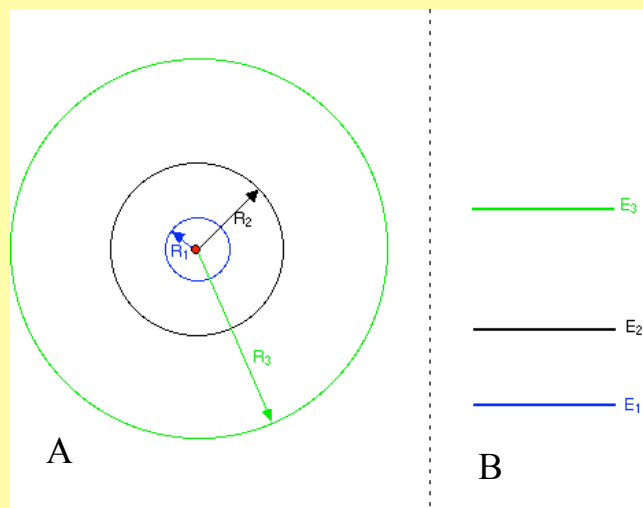
**Le bande di energia
in un solido**



**Come riempiono gli elettroni le
bande di energia**

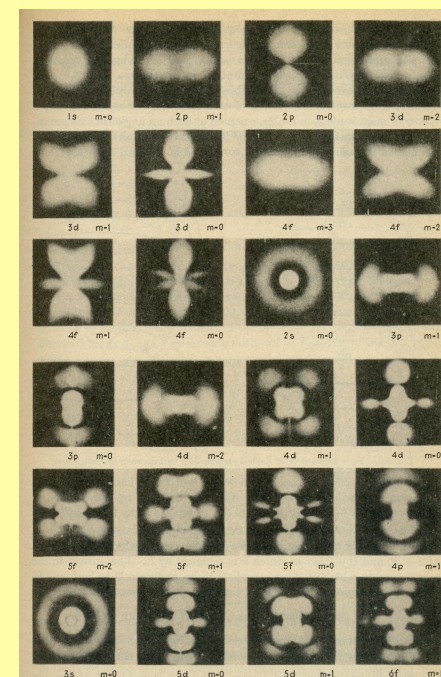
Atomi

Come si rappresenta un atomo...?



A) Orbite elettroniche in un atomo
B) Livelli energetici elettronici rispetto al nucleo

Le orbite elettroniche sono
...zone di spazio: **orbitali**



Orbitali

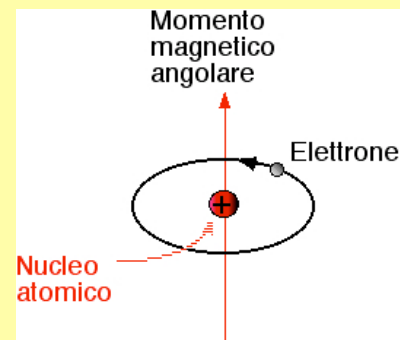
Orbitali elettronici di un atomo di idrogeno:

- ✓ $n=1$ (alto a sinistra) il piu' vicino al nucleo e occupa lo spazio piu' piccolo
- ✓ $n>1$ hanno energia maggiore e occupano generalmente uno spazio piu' grande e sono piu' lontani dal nucleo

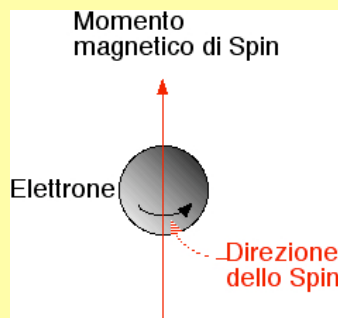
Atomi

Che moti ci sono in un atomo...?

1. moto orbitale e- intorno al nucleo: momento angolare

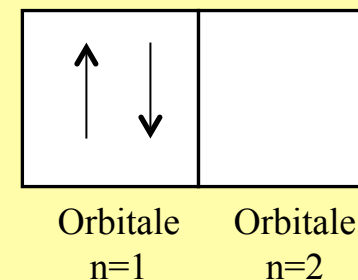


1. spin e-: momento di spin



2. Il principio di esclusione di Pauli: Due elettroni con spin opposto possono occupare lo stesso orbitale. Staranno **piu'** vicini fra loro e cio' comportera' una **maggiore repulsione**

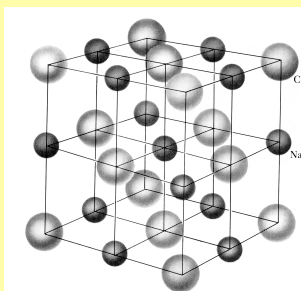
Rappresentazione schematica di orbitali e spin



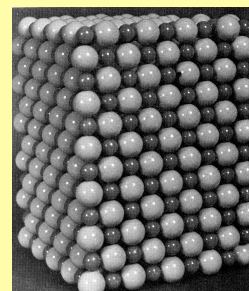
Solidi

Cosa avviene quando si avvicinano N atomi...?

Possono nascere dei solidi: gli atomi formano un reticolo tridimensionale

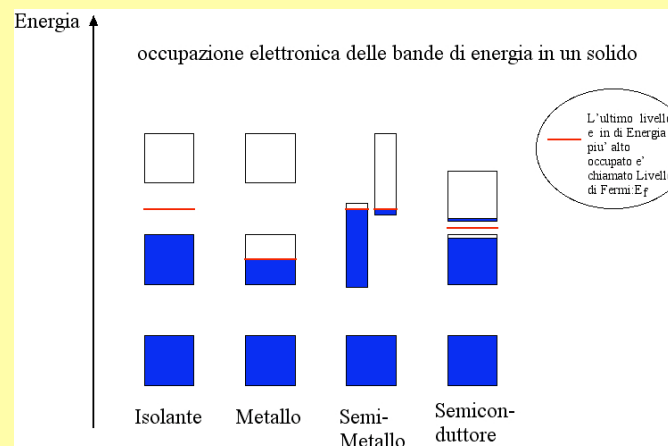
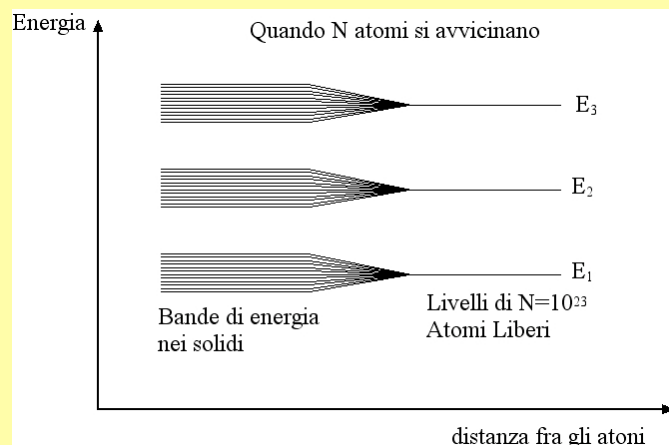


NaCl



I livelli energetici degli elettroni negli atomi singoli si sovrappongono:

si formano delle bande di energia con N livelli

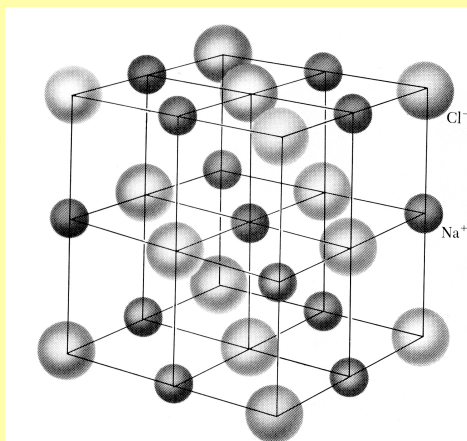


Gli elettroni occupano le bande rispettando il principio di Pauli

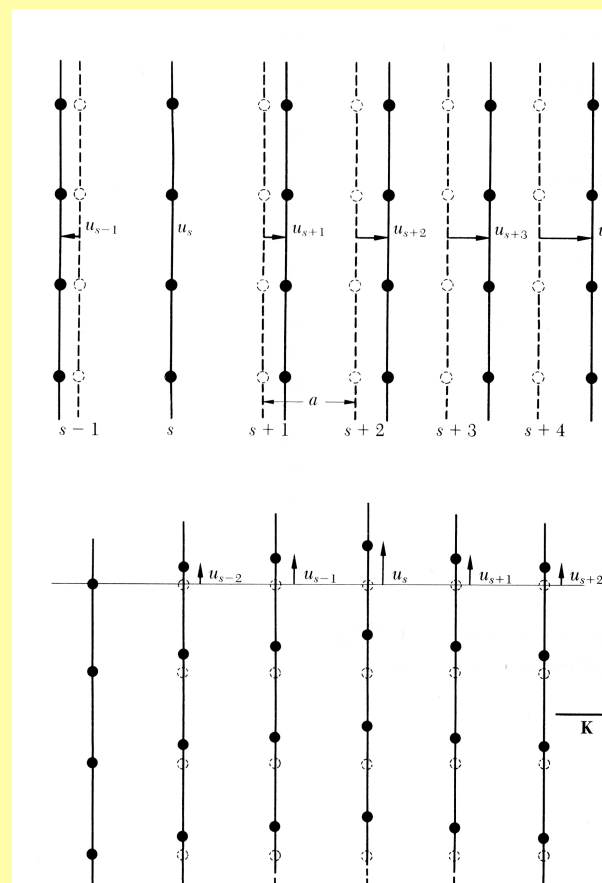
Solidi

I reticoli di atomi vibrano...?

Il reticolo di atomi ha delle vibrazioni stazionarie intorno al loro punto di equilibrio: **fononi**



Moto (fononi)
longitudinali



Moto (fononi)
trasversali

Magnetismo nella materia

Ci sono sostanze con una attività magnetica...?

Si! Sono chiamate sostanze magnetiche, eccole:

1 H																	2 He		

Elementi e relativo tipo di magnetismo a temperatura ambiente.

Magnetismo nella materia

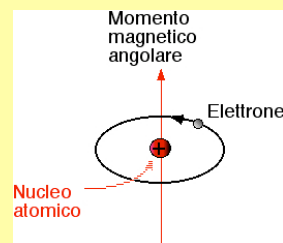
Come si misura questa attivita' magnetica...?

Il campo interno **B** e' indice di questa **attivita'**. E' funzione:

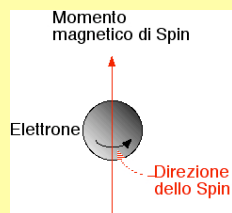
- intensita' del campo magnetico applicato **H**
- caratteristiche intrinseche del materiale

Le proprieta' magnetiche intrinseche sono di origine atomica:

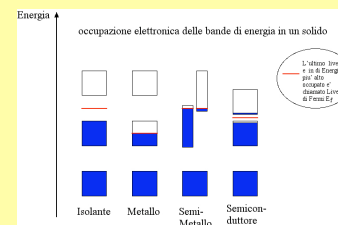
1. moto orbitale e- intorno al nucleo



1. spin e-



2. stato di riempimento dei livelli elettronici dell' ultima banda energia nella materia



Magnetismo nella materia

Come identifichiamo il magnetismo...?

Definiamo intensita' di magnetizzazione' **M** (tesla) il momento magnetico **m** per unita' di volume (1m^3)

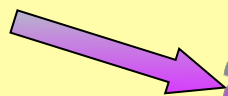
Nel caso della **materia** la relazione fra **B, H** **cambia** rispetto al **vuoto**. La presenza del **materiale** sara' descritto da **M**

➤ $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$

vuoto

$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M}$

materia



azione magnetica della materia

Inoltre esiste una relazione fra **M** e **H**:

➤ $\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$

χ e' definita la **suscettivita' magnetica**, l'unita' di misura e' **henry*metro** (la stessa di μ_0)

Magnetismo nella materia

la suscettività e la permeabilità

E' possibile misurare la χ in unita' di μ_0

La suscettività relativa $\chi_{rel} = \chi/\mu_0$ e' una quantita' adimensionale

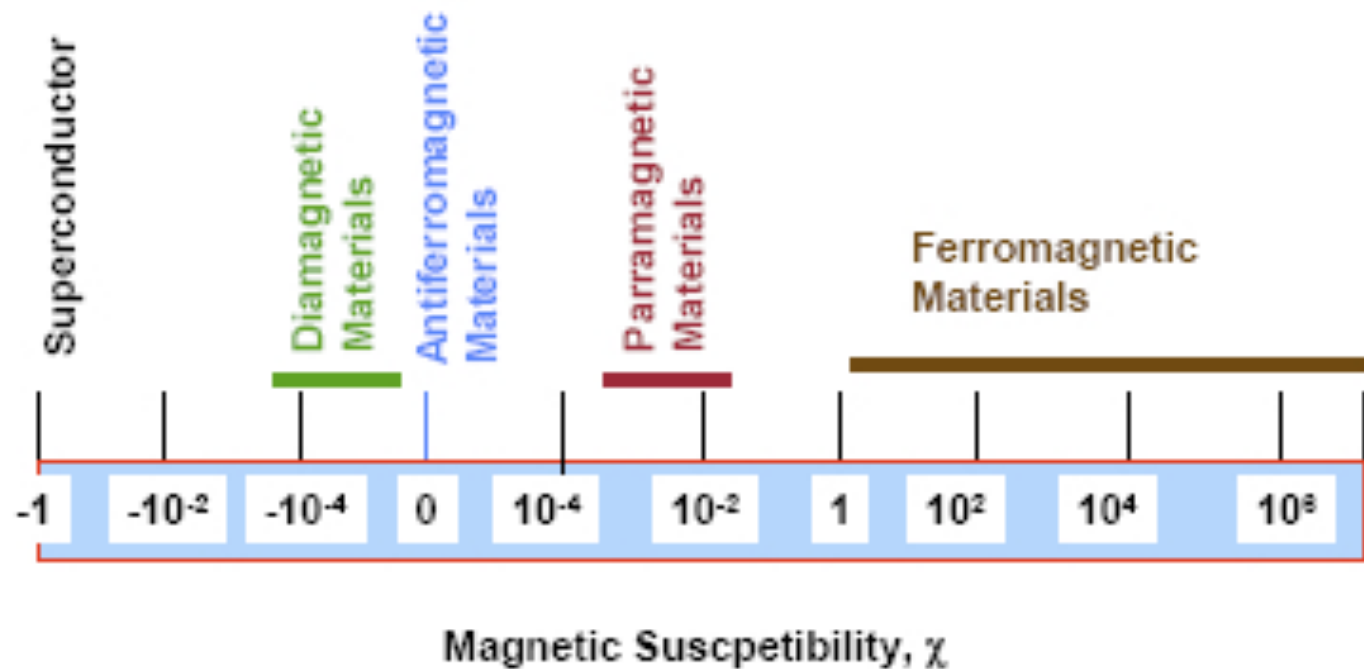
$$\mathbf{B} = \chi\mathbf{H} + \mu_0\mathbf{H} = (\chi + \mu_0)\mathbf{H} = \mu\mathbf{H},$$

➤ μ e' la **permeabilità magnetica** del mezzo (henry·metro)
usualmente si usa la permeabilità relativa

$$\mu_{rel} = \mu/\mu_0 = (\chi_{rel} + 1) \quad \longrightarrow \quad \text{e' un numero puro}$$

Magnetismo nella materia

La suscettività

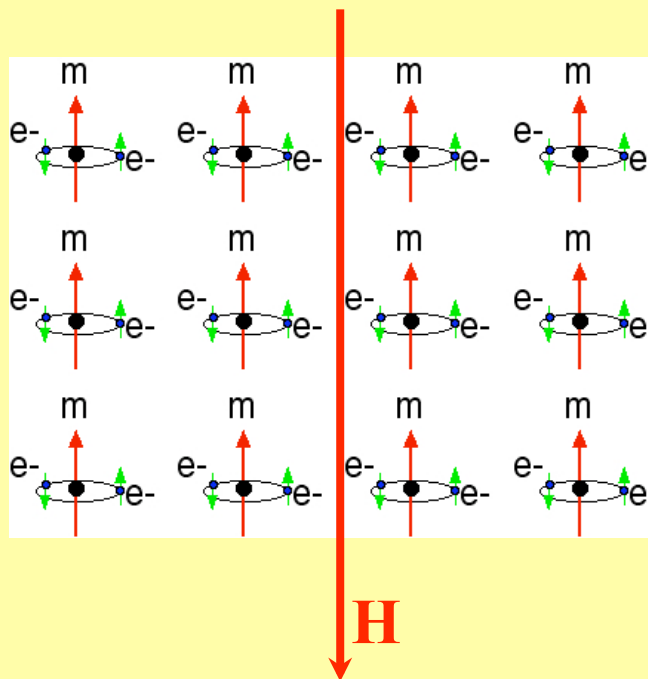


Esistono vari tipi di magnetismo e ognuno e' caratterizzato da una ben definita comportamento

Diamagnetismo

poche ma tutti partecipano

il moto orbitale elettronico



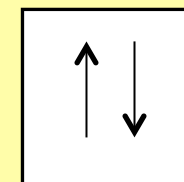
Come si presenta:

- ✓ Reazione debole, negativa e repulsiva di un materiale sottoposto a un campo magnetico applicato
- ✓ Il diamagnetismo scompare quando il campo magnetico esterno cessa di esistere
- ✓ La suscettività è $\chi < 0$ negativa con un effetto piccolo: $|\chi| \approx 10^{-5}$

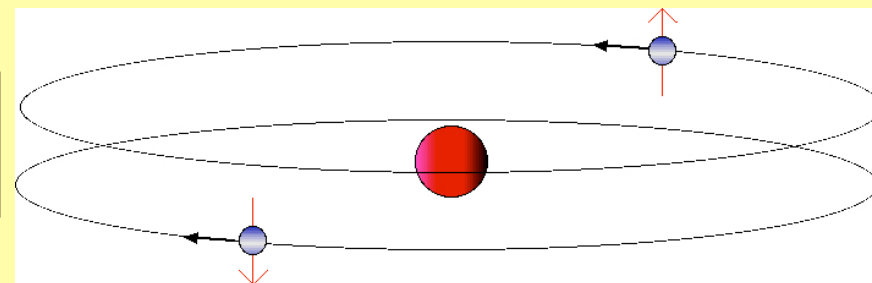
Diamagnetismo

quale e' la causa?

- ✓ Gli elettroni occupano completamente fino all'ultimo livello energetico (E_f) hanno momento angolare complessivo **nullo**:
 - ❑ elettroni accoppiati (spin su e spin giu') e controrotanti lungo le orbite
- ✓ Correnti microscopiche associate al moto degli elettroni nell'atomo danno luogo a momenti magnetici che si compensano:
- ❑ il moto orbitale di rotazione degli elettroni intorno al nucleo ha momento angolare totale nullo



I campi magnetici generati dai due elettroni (spire percorse da corrente) sono uguali e contrari

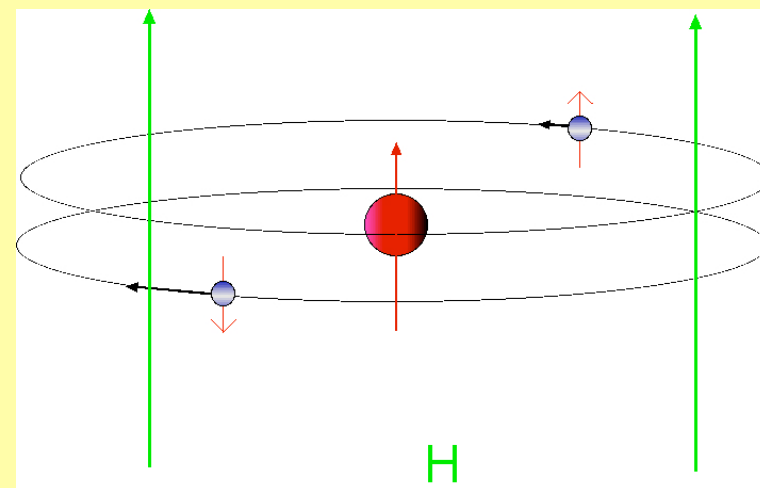


Diamagnetismo

quale e' la causa?

✓ Quando c'è un campo magnetico esterno, il moto degli elettroni viene **perturbato**

✓ La forza di Lorentz [$f = ev \times B$] aumenta la velocità orbitale dell'elettrone rotante in una direzione e diminuisce quella dell'altro:



□ non si compensano più esattamente i momenti magnetici dei due elettroni

✓ Dalla legge di Lenz la corrente indotta produce un flusso magnetico che si oppone a ogni cambio del campo esterno:

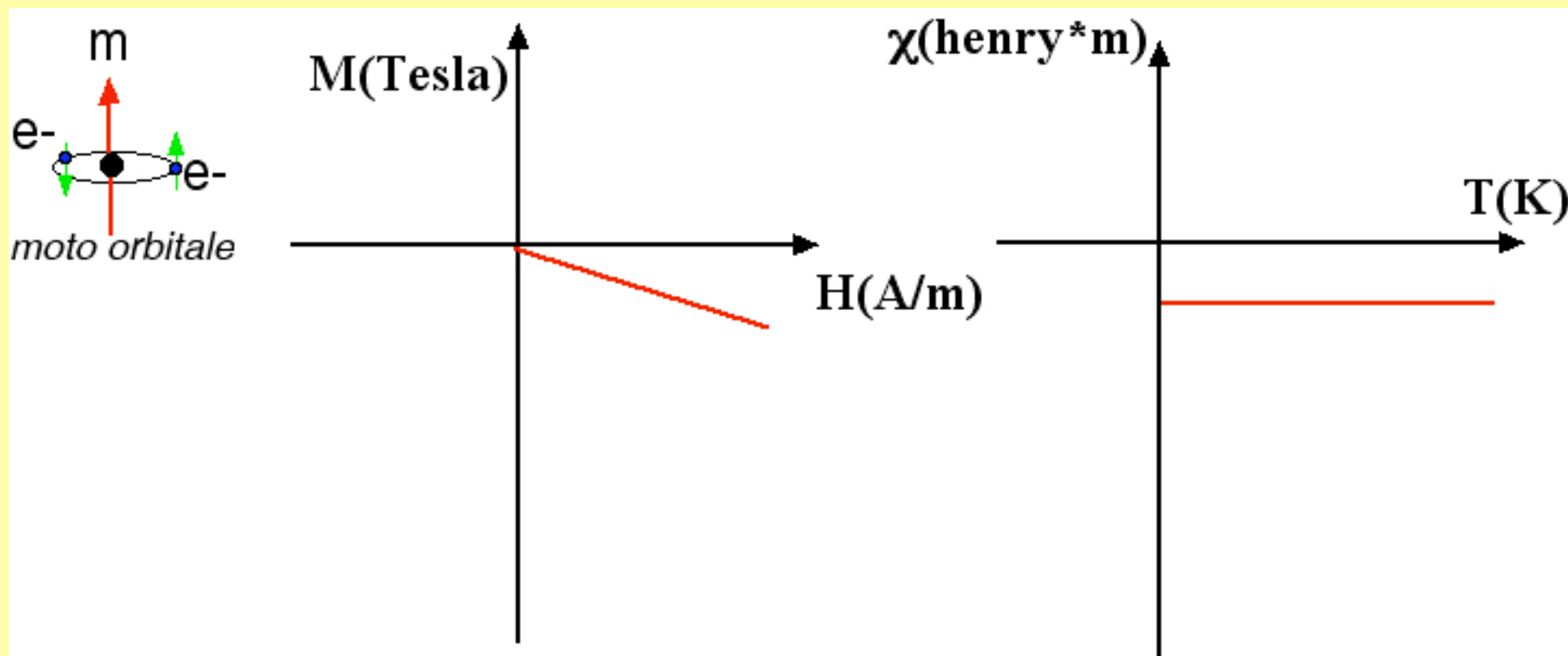
□ compare un debole **momento magnetico** opposto al campo (dipolo indotto)



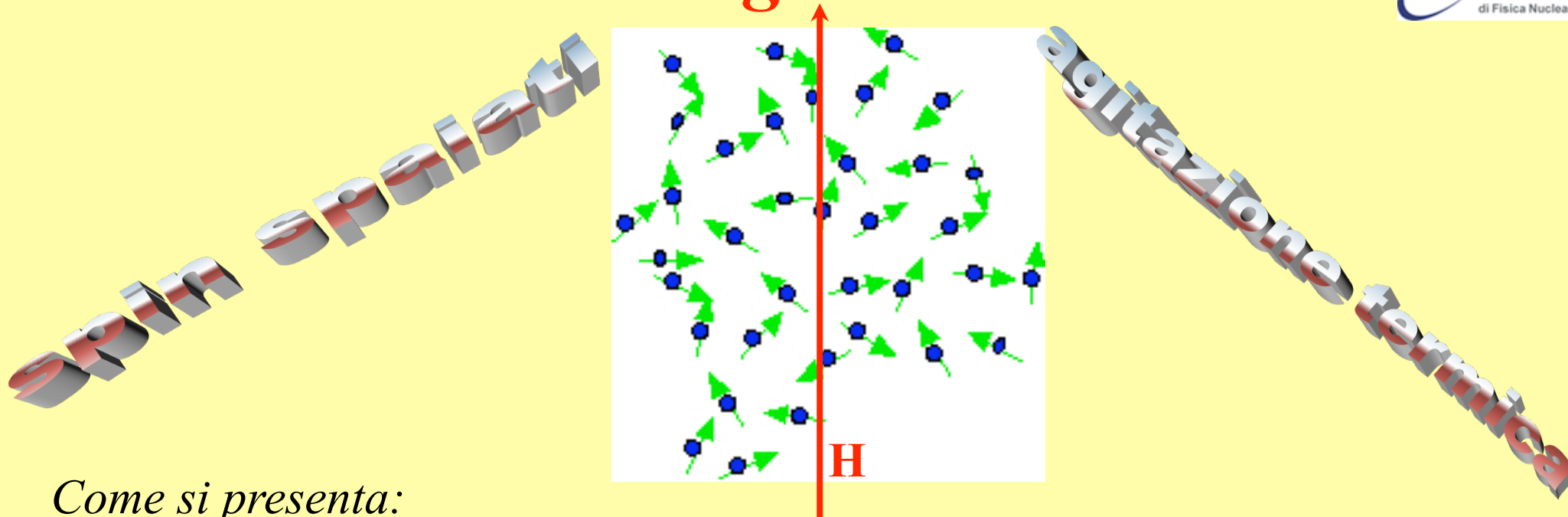
✓ contribuiscono tutti gli elettroni sotto il livello di Fermi

Diamagnetismo

Come va la Magnetizzazione?



Paramagnetismo



Come si presenta:

- ✓ Reazione debole, positiva ad un campo magnetico applicato
- ✓ Il paramagnetismo scompare quando il campo magnetico esterno cessa di esistere
- ✓ La magnetizzazione M e' proporzionale al campo magnetico H
- ✓ La suscettivita' e' $\chi > 0$ positiva, un effetto piccolo: $|\chi| \approx [10^{-3} - 10^{-5}]$
- ✓ Un aumento della temperatura riduce l'effetto.

Paramagnetismo

quale e' la causa?

- ✓ C'è un elettrone spaiato. In molti casi tali sostanze contengono atomi magnetici o ioni i cui spin sono isolati rispetto all'ambiente
- ❑ Non esiste interazione fra i dipoli magnetici dovuti agli spin
- ✓ A temperatura finita gli spin sono agitati termicamente e hanno orientazioni a caso:
- ❑ il materiale non presenta momento magnetico

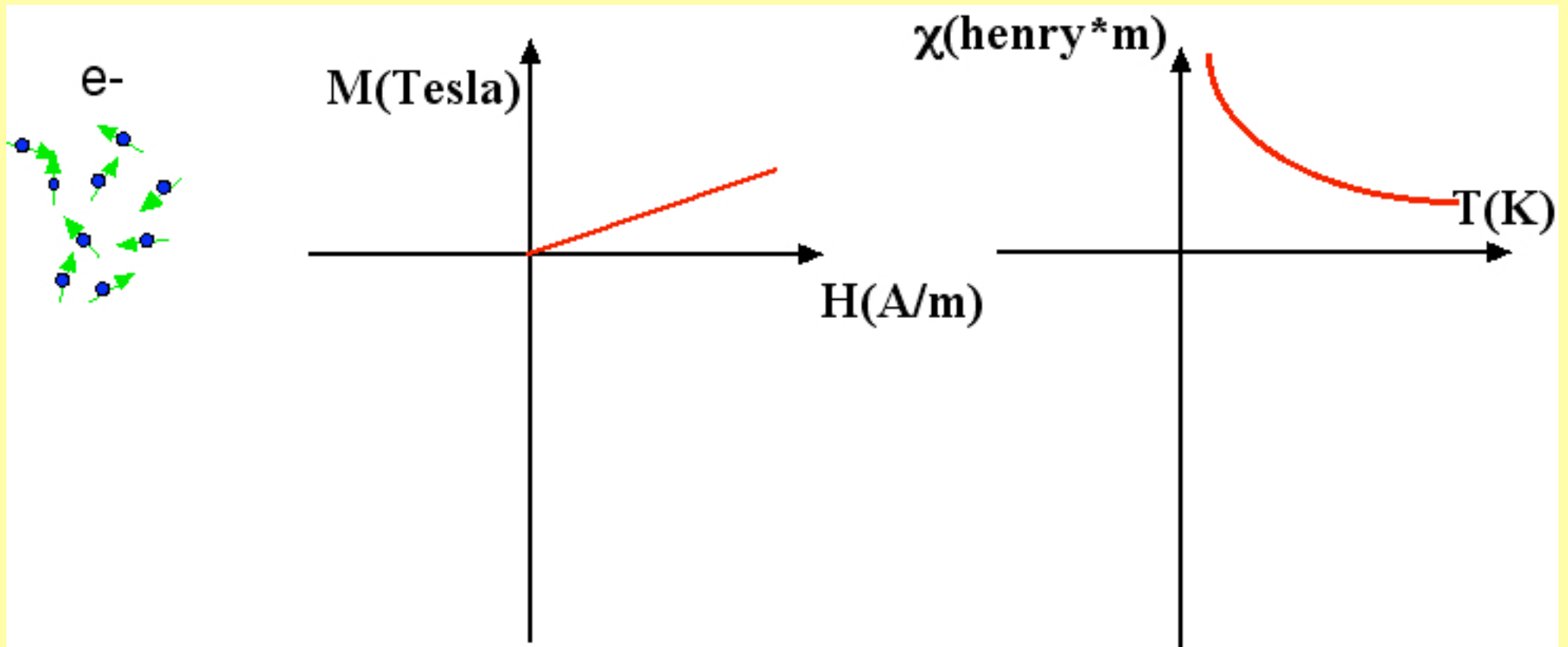
Paramagnetismo

quale e' la causa?

- ✓ Con un campo magnetico le **orientazioni medie** degli **spin** sono leggermente cambiate:
- ❑ si produce una debole magnetizzazione parallela al campo magnetico applicato
- ❑ La suscettività e' inversamente proporzionale alla temperatura (Legge di Curie): $\chi = C \cdot \frac{1}{T}$

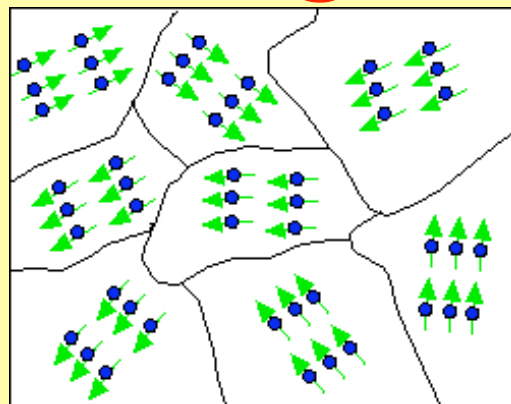
Paramagnetismo

Come va la Magnetizzazione?



Ferromagnetismo

spin spontanei si sentono forte



...e l'agitazione termica non può nulla

Come si presenta:

- ✓ Ha un momento spontaneo anche quando non è applicato un campo magnetico esterno
- ✓ Reazione positiva di un materiale ad un campo magnetico applicato
- ✓ Materiali ferromagnetici si magnetizzano fortemente, contribuendo ad alzare il campo magnetico esterno
- ✓ La suscettività è $\chi > 0$ positiva, un effetto grande: $|\chi| \gg 1$

Ferromagnetismo

Come si presenta:

- ✓ C'è un **campo magnetico residuo**, M_s , una volta cessato il campo magnetico esterno,

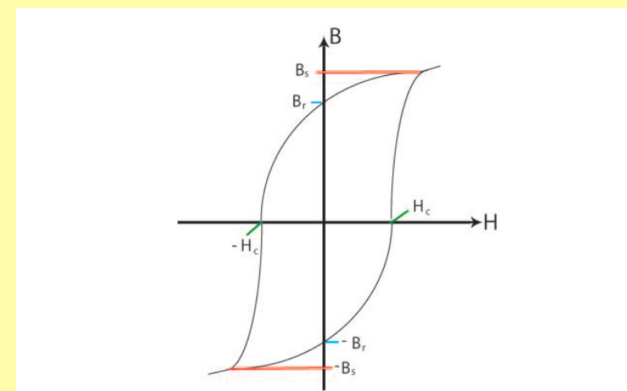
ovvero magneti permanenti

M_s piccolo $\rightarrow$ cuore di trasformatori

M_s grande $\rightarrow$ registrazione magnetica

- ✓ Presentano inoltre il cosiddetto **ciclo d'isteresi** quando il campo magnetico esterno cambia verso

- ✓ C'è una temperatura di Curie al di sopra della quale il ferromagnetismo scompare
(Fe=770°C; Co =1123°C; Ni=358°C)



- ❖ *E' una transizione di fase. Sopra tale temperatura sono paramagnetici*

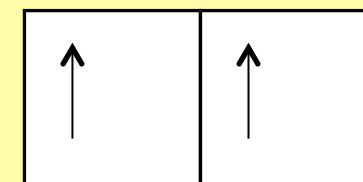
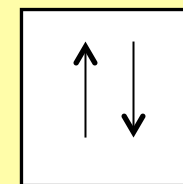
Ferromagnetismo

quale e' la causa?

- ✓ L'effetto e' basato su un ordine regolare degli spin nella materiale:
- L'ordine tende a minimizzare l'energia d'interazione fra gli spin:

campo di Scambio

- L'allineamento parallelo degli spin rappresenta lo stato **piu'** **favorevole** dal punto di vista energetico
- ✓ **L'interazione di scambio e' conseguenza del Principio di esclusione di Pauli (Weiss):**
- Due elettroni con spin opposto occupano lo **stesso orbitale**, sono piu' vicini, c'e' una **maggiore repulsione** hanno stessa carica elettrica
- Elettroni con **spin uguale** occuperanno **orbitali diversi**; la repulsione Coulombiana sara' inferiore



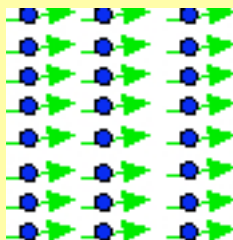
Ferromagnetismo

quale e' la causa?

- ❑ la forza di repulsione di Coulomb favorisce l'allineamento parallelo degli spins di tutti gli elettroni per minimizzare l'energia di scambio
- ✓ A questo allineamento si oppone all'energia termica
- ✓ A livello microscopico si formano **domini** con grandi valori di **m**

dominio di Weiss

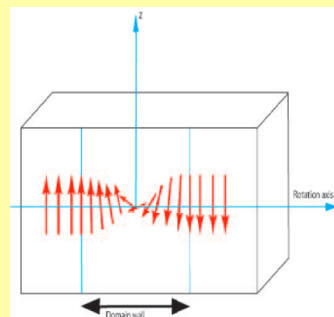
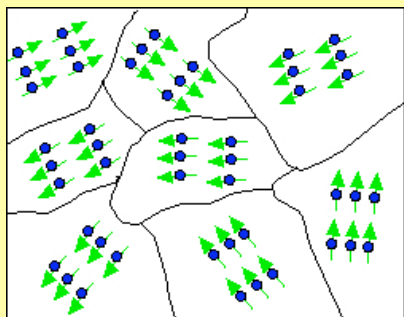
- ✓ L'energia del dominio e' piu' grande rispetto alla energia termica



Ferromagnetismo

quale e' la causa?

- ✓ Un ferromagnete consiste in molti domini (parecchi micron):
- ❑ Nei domini tutti i momenti magnetici dovuti agli spin sono rigidamente allineati parallelamente in qualche **loro** specifica direzione
- ❑ differenti domini sono allineati in differenti direzioni
- ❑ la regione di confine fra domini consiste in un graduale rotazione dei momenti magnetici



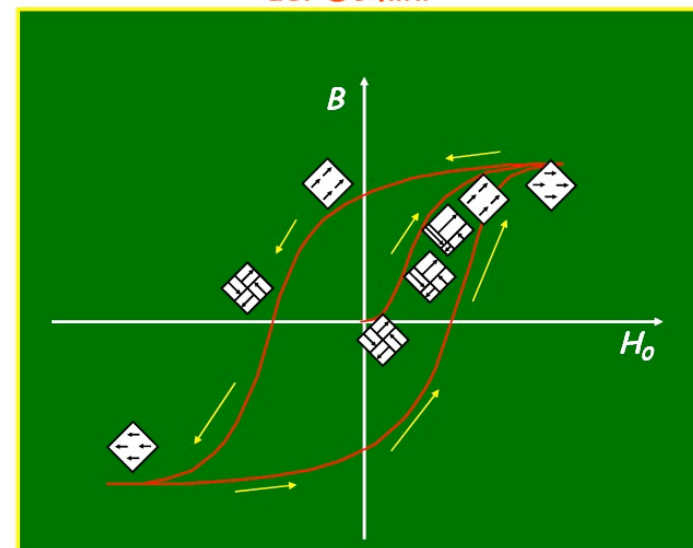
Muri di Bloch

Ferromagnetismo

quale e' la causa?

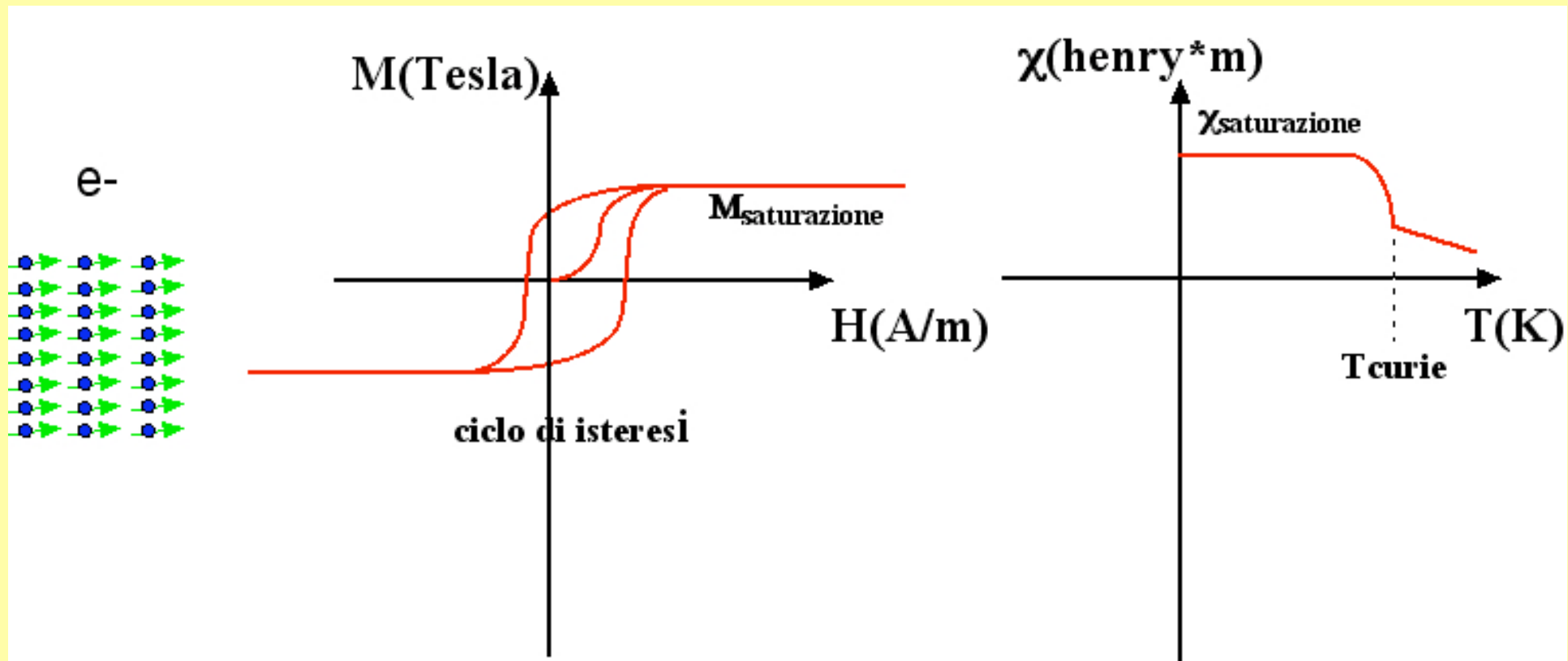
- ❑ A campi alti tutti i domini finiscono per allinearsi $\Rightarrow$ **Saturazione**
- ❑ Il moto relativo di un dominio rispetto ad un altro presenta viscosita' e questo da $\Rightarrow$ **Isteresi e Magnetizzazione permanente**
- ✓ Con il crescere della temperatura la struttura di spin e' disturbata dalla agitazione termica. A una data temperatura si rompono i legami dei domini di Weiss $\Rightarrow$ **Temperatura di Curie**
- ❑ A $T > T_c$ paramagnetismo si ha la legge di Curie –Weiss $\chi = C/(T - T_c)$

Diagramma di Isteresi e orientamento dei Domini



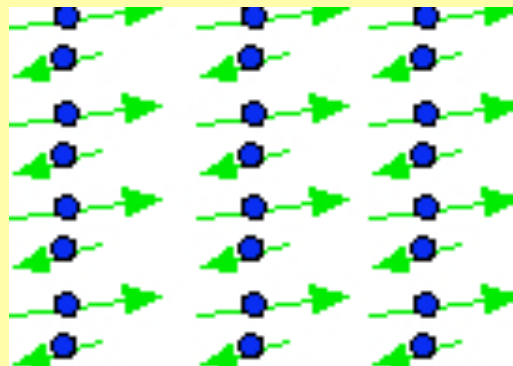
Ferromagnetismo

Come va la Magnetizzazione?



Ferrimagnetismo

sostanze differenti



stati diversi

Come si presenta:

- ✓ Tipo di magnetismo permanente simile ma non analogo al ferromagnetismo
- ✓ Si ha quando gli spin degli ioni vicini tendono ad allinearsi in verso opposto, compensando reciprocamente e parzialmente il magnetismo, ma il numero degli ioni e' differente
- ✓ Si ha in materiali composti da diverse sostanze o con presenza nella struttura cristallina di ioni
- ✓ Manifestano ancora grandi valori di $\chi \geq 1$

Ferrimagnetismo

Come si presenta:

- ✓ Presentano ciclo di Isteresi di solito molto elevata
- ✓ La Temperatura di **Neel** e' la temperatura sotto la quale abbiamo il ferrimagnetismo
- ✓ Sopra la temperatura di Neel T_N , la magnetizzazione scompare e ha un comportamento paramagnetico
- ✓ Minerali **ferrimagnetici**:
Titanomagnetiti, Ilmeniti FeTiO_3 , ferriti (magnetite Fe_3O_4)



Ferrimagnetismo

quale e' la causa?

- ✓ In queste sostanze gli ioni magnetici occupano due differenti tipi di siti reticolari, A e B.
- ❑ Gli spin di A puntano ad esempio la direzione (+), quelli B direzione (-): la causa e' una forte interazione negativa fra i due sistemi di spin
- ❑ Il numero degli ioni e l'ampiezza dello spin dei singoli ioni sono differenti sui siti A e B, l'ordinato arrangiamento degli spin fa nascere una **Magnetizzazione spontanea**
- ✓ si formano ancora domini di Weiss
- ✓ con l'aumento della temperatura si ha un disturbo della configurazione degli spin a causa dell'agitazione termica

Ferrimagnetismo

Come va la Magnetizzazione?

