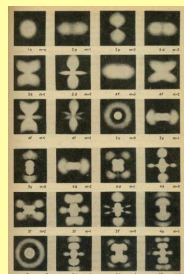
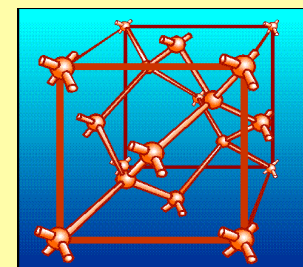
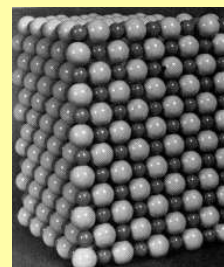


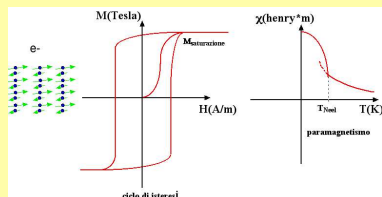
Le orbite degli elettroni in atomo di idrogeno



Forma spaziale degli Orbitali elettronici di atomo di idrogeno



Un solido

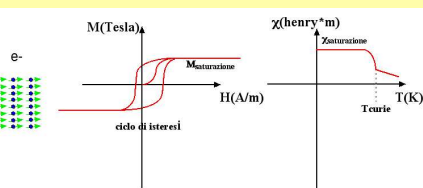


ferrimagnetismo

Il magnetismo nella materia

Dr. Daniele Di Gioacchino

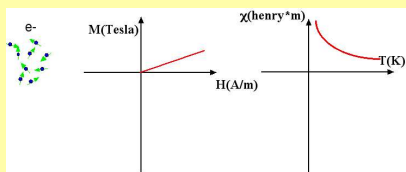
**Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Laboratori Nazionali di Frascati**



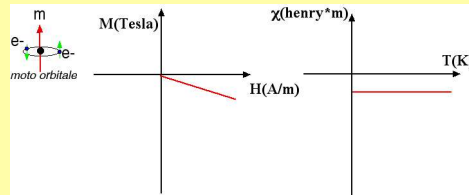
ferromagnetismo



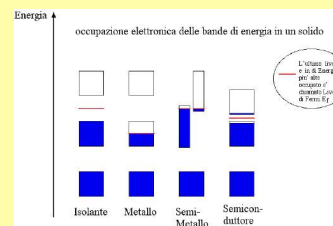
Le bande di energia in un solido



paramagnetismo

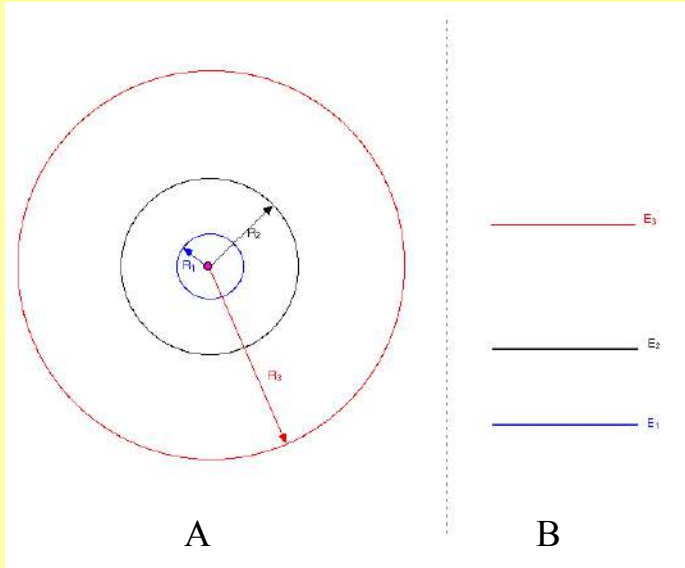


diamagnetismo



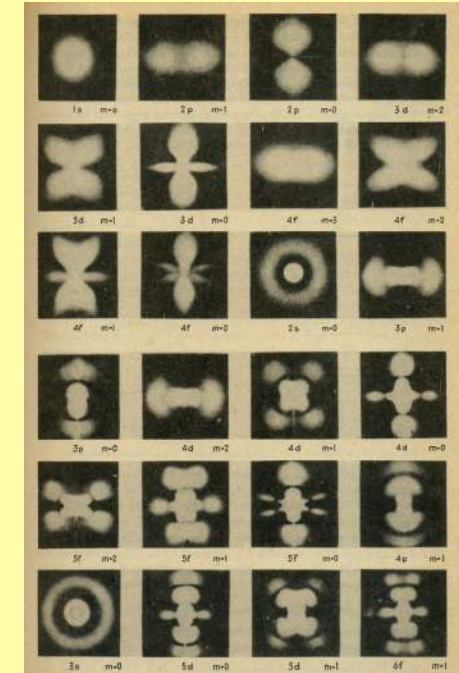
Come riempiono gli elettroni le bande di energia

Come si rappresenta un atomo. *Atomi*



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:

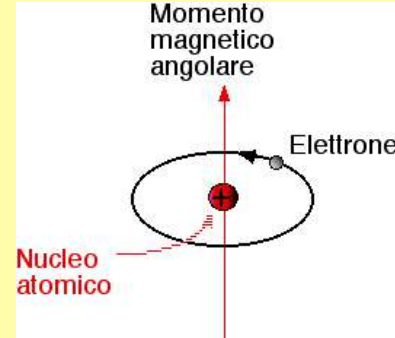
- ✓ $n=1$ (alto a sinistra) il più vicino al nucleo e occupa lo spazio più piccolo
- ✓ $n>1$ hanno energia maggiore e occupano generalmente uno spazio più grande e sono più lontani dal nucleo

➤ Gli *Orbitali* sono descritti dal quadrato della funzione d'onda elettronica, Ψ , proporzionale alla **probabilità** di presenza in una data regione dello spazio

Atomi

Che moti ci sono in un atomo...?

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

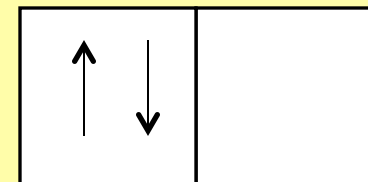


1. spin e-: momento di spin



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



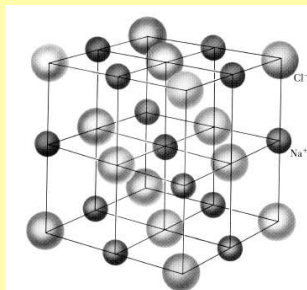
Orbitale
n=1

Orbitale
n=2

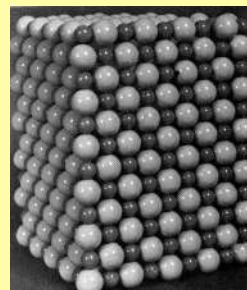
Solidi

Cosa avviene quando si avvicinano N atomi...

Possono nascere dei solidi: gli atomi formano un reticolo tridimensionale

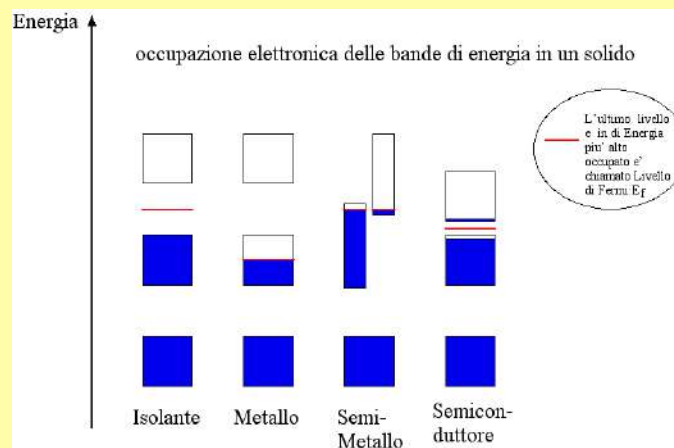
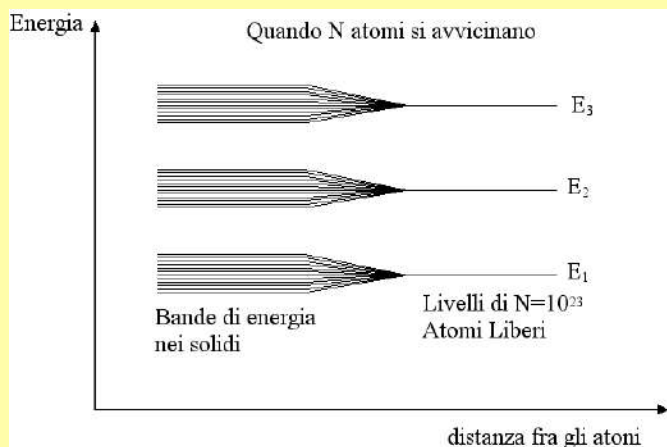


NaCl



I livelli energetici degli elettroni negli atomi singoli si sovrappongono:

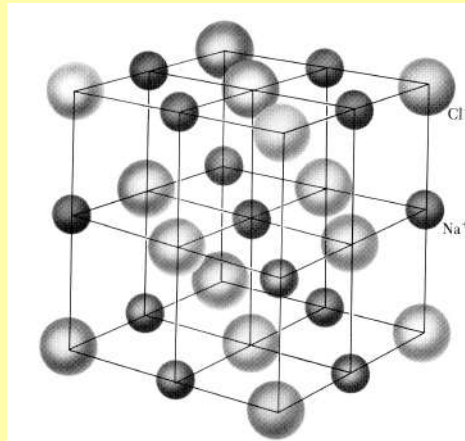
si formano delle bande di energia con N livelli



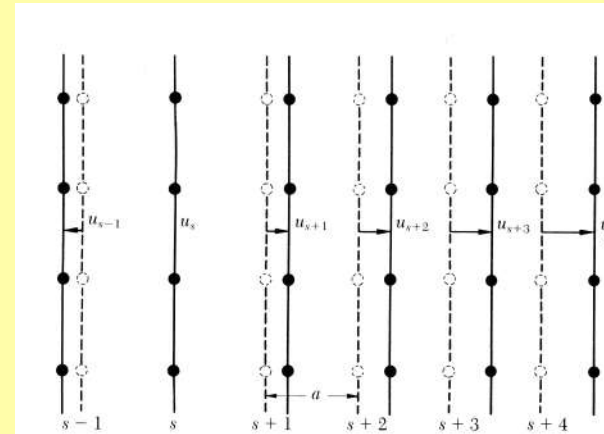
Gli elettroni occupano le bande rispettando il principio di Pauli

Solidi I reticoli di atomi vibrano.

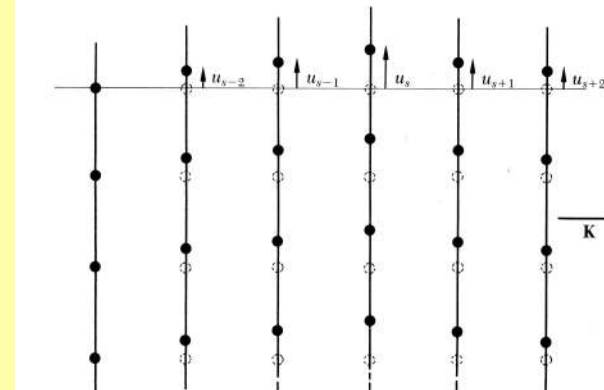
Il reticolo di atomi ha delle vibrazioni stazionarie intorno al loro punto di equilibrio: **fononi**



Moto (fononi)
longitudinali



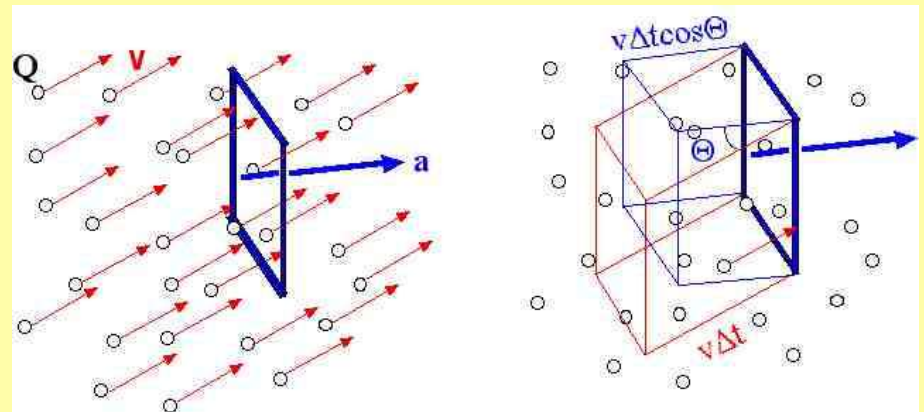
Moto (fononi)
trasversali



viene quando c'è una corrente elettrica scorre in un reticolo di atomi vibranti.

I LEGGE DI OHM

Consideriamo degli elettroni che viaggiano in un conduttore



Ai capi del conduttore c'è una differenza di potenziale (Tensione) ΔV che produce un campo elettrico E nel conduttore

Solidi

viene quando c'è una corrente elettrica scorre in un reticolo di atomi vibranti.

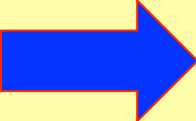
I° LEGGE DI OHM

- Ricordo che gli elettroni hanno un comportamento anche ondulatorio
- si muovono nel reticolo di ioni **imperturbati senza perdite** perchè la regolarità ondulatoria del reticolo fa sull'onda elettronica una diffrazione costruttiva
- Quale è l'effetto del “disturbo” creato dalla vibrazione degli ioni del reticolo (i fononi)?

Solidi

viene quando c'è una corrente elettrica scorre in un reticolo di atomi vibranti.

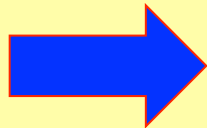
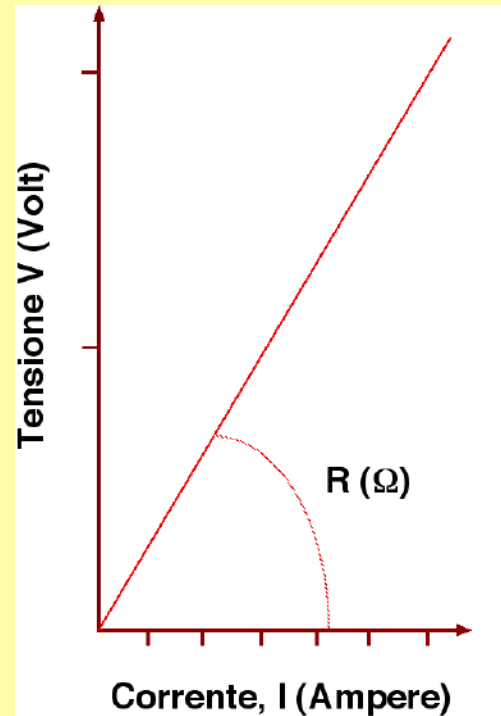
I° LEGGE DI OHM

- La loro velocità in un campo E dovrebbe crescere mano a mano che procedono nella zona ma invece è **costante** (velocità di deriva)
 - Elettroni nel loro moto sono diffusi dalle vibrazioni reticolari e perdono energia
- ☐ C'è una resistenza al moto elettronico  **La I° legge di OHM**

Solidi

viene quando c'è una corrente elettrica scorre in un reticolo di atomi vibranti.

I LEGGE DI OHM

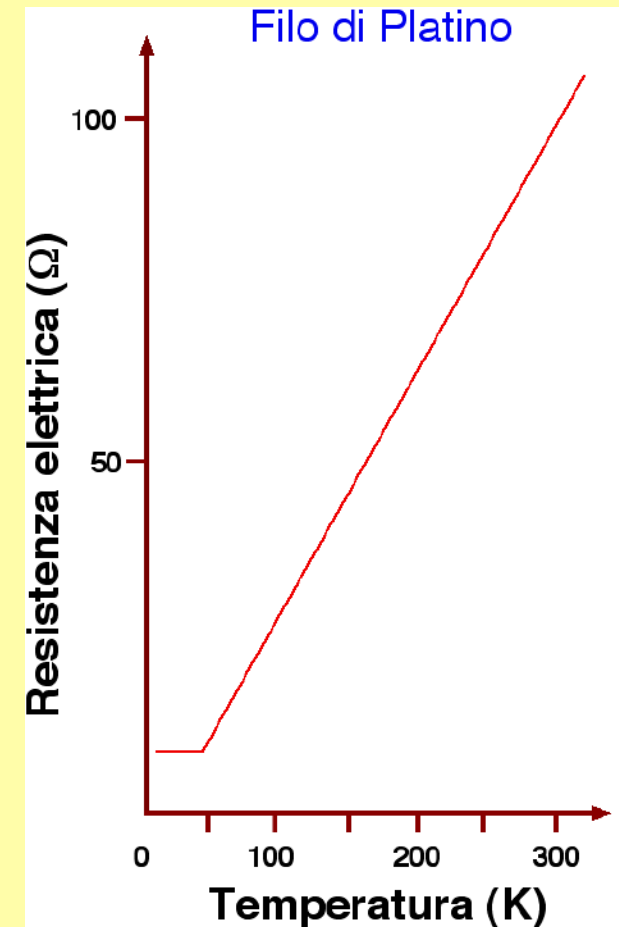


$$V(\text{Volt}) = R(\Omega) \times I(\text{Ampere})$$

Solidi

abbassa la Temperatura cosa avviene alla resistenza di un Conduttore...

- Scende linearmente con la temperatura
- A bassa T possiede un 'plateau'



Magnetismo nella materia

Ci sono sostanze con una attività magnetica...?

Si! Sono chiamate sostanze magnetiche, eccole:

1 H																	2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra	89 Ac																
			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		

Ferromagnetic
 Antiferromagnetic
 Paramagnetic
 Diamagnetic

Elementi e relativo tipo di magnetismo a temperatura ambiente.

Magnetismo nella materia

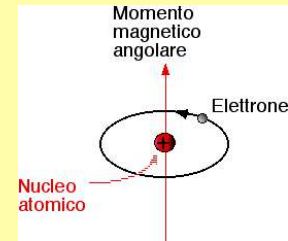
Come si misura questa attivita' magnetica...

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:

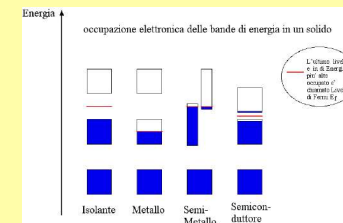
1. moto orbitale e- intorno al nucleo



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**

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

vuoto

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

materia

azione magnetica della materia

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

$$\triangleright \mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$$

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

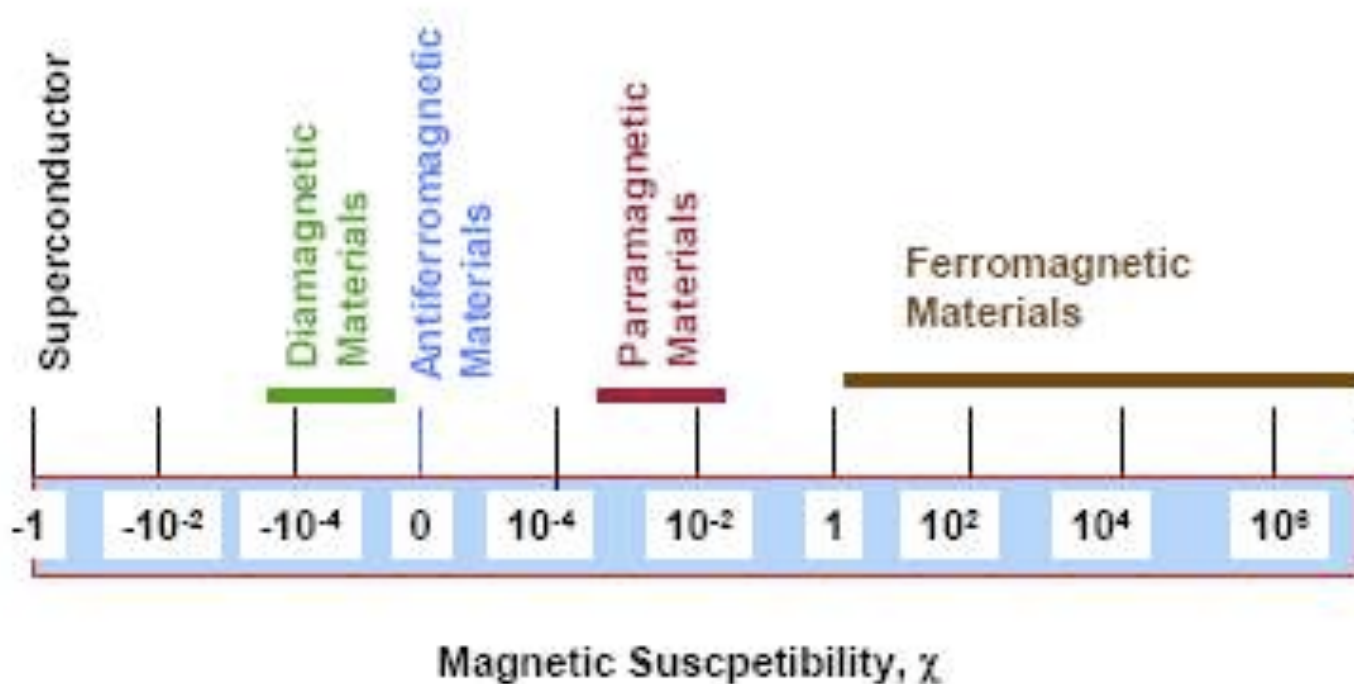
$$\mathbf{B} = \chi\mathbf{H} + \mu_0\mathbf{H} = (\chi + \mu_0)\mathbf{H} = \mu\mathbf{H},$$

➤ 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

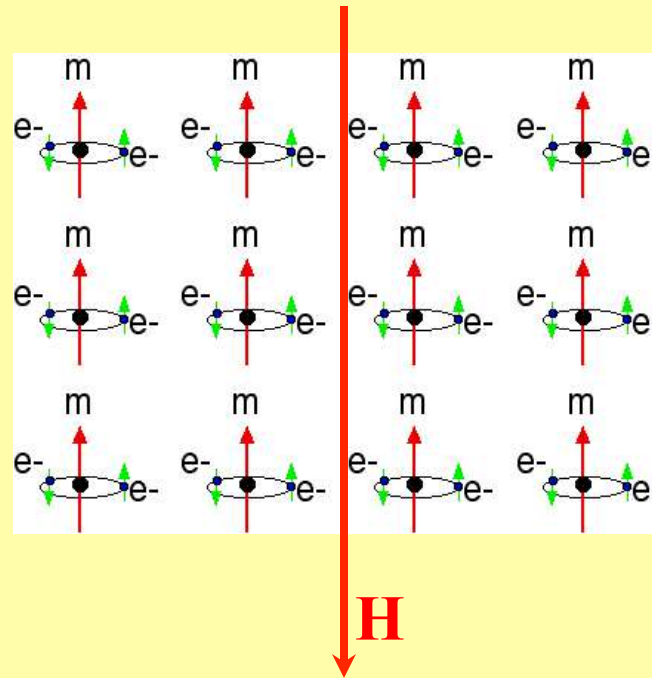


Esistono vari tipi di magnetismo e ognuno e' caratterizzato da una ben definita comportamento

Diamagnetismo

...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: $|\chi| \approx 10^{-5}$

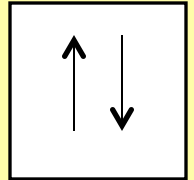
Diamagnetismo

<i>Diamagnetics</i>	
<i>Material</i>	<i>Susceptibility</i> χ_m (volume) (SI units)
Aluminum oxide	-1.81×10^{-5}
Copper	-0.96×10^{-5}
Gold	-3.44×10^{-5}
Mercury	-2.85×10^{-5}
Silicon	-0.41×10^{-5}
Silver	-2.38×10^{-5}
Sodium chloride	-1.41×10^{-5}
Zinc	-1.56×10^{-5}

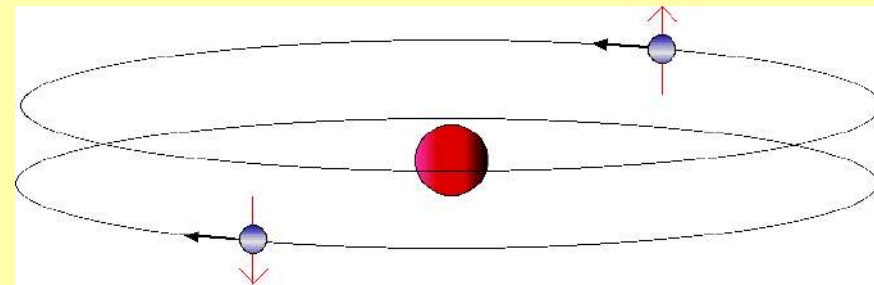
Diamagnetismo

quale è la causa?

- ✓ Gli elettroni occupano completamente fino all'ultimo livello energetico (E_f) hanno momento angolare complessivo **nullo**:
- ☐ elettroni accoppiati (spin su e spin giù) 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



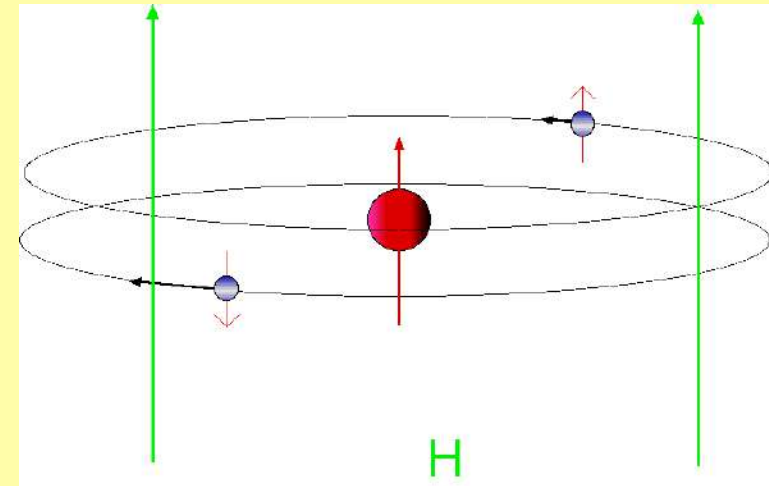
Quale e' la causa?

Diamagnetismo

✓ 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:

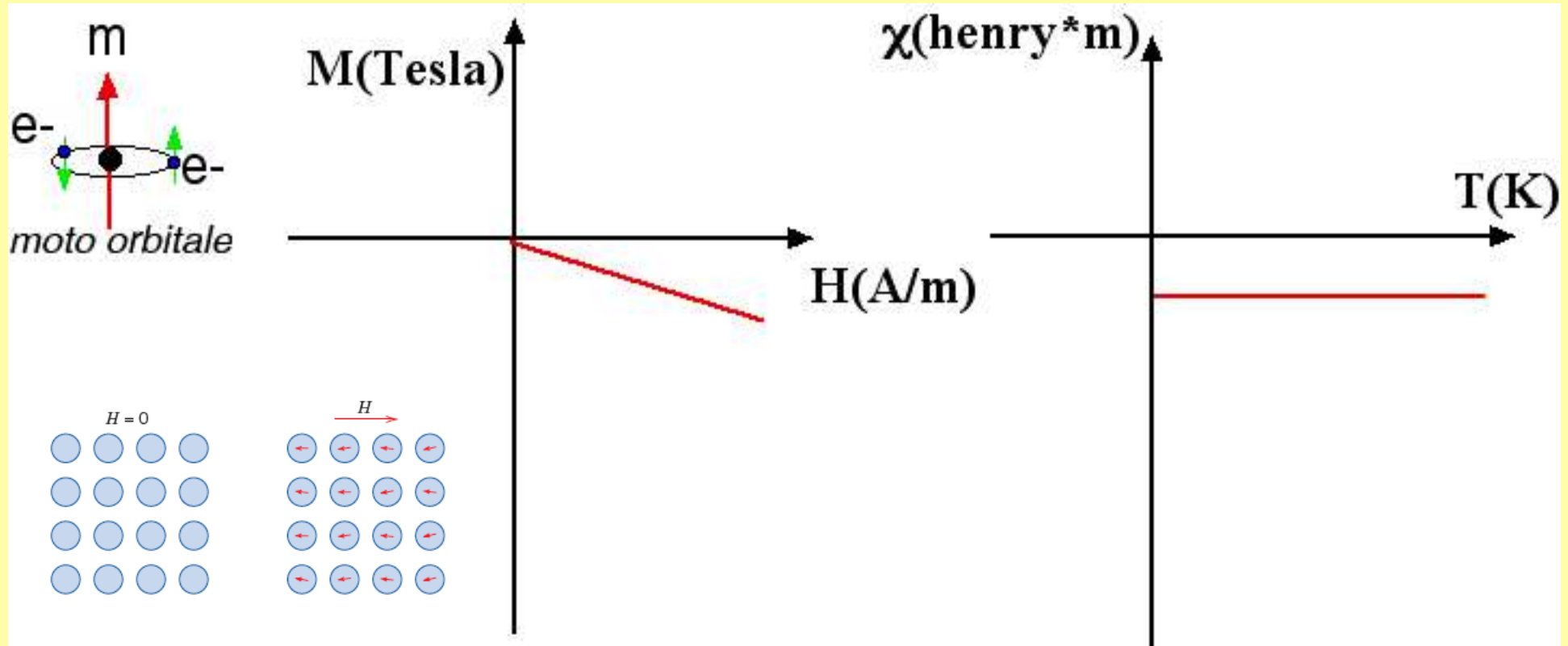
☐ compare un debole **momento magnetico** opposto al campo (dipolo indotto)



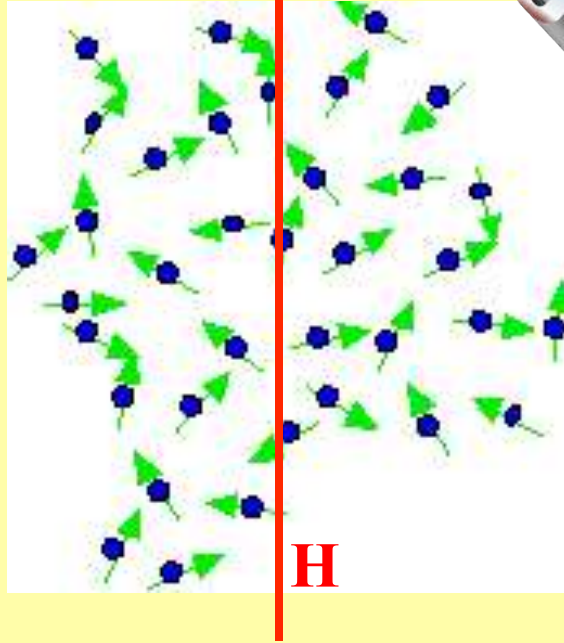
✓ contribuiscono tutti gli elettroni sotto il livello di Fermi

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

<i>Paramagnetics</i>	
<i>Material</i>	<i>Susceptibility</i> χ_m (<i>volume</i>) (<i>SI units</i>)
Aluminum	2.07×10^{-5}
Chromium	3.13×10^{-4}
Chromium chloride	1.51×10^{-3}
Manganese sulfate	3.70×10^{-3}
Molybdenum	1.19×10^{-4}
Sodium	8.48×10^{-6}
Titanium	1.81×10^{-4}
Zirconium	1.09×10^{-4}

Paramagnetismo

Quale è 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

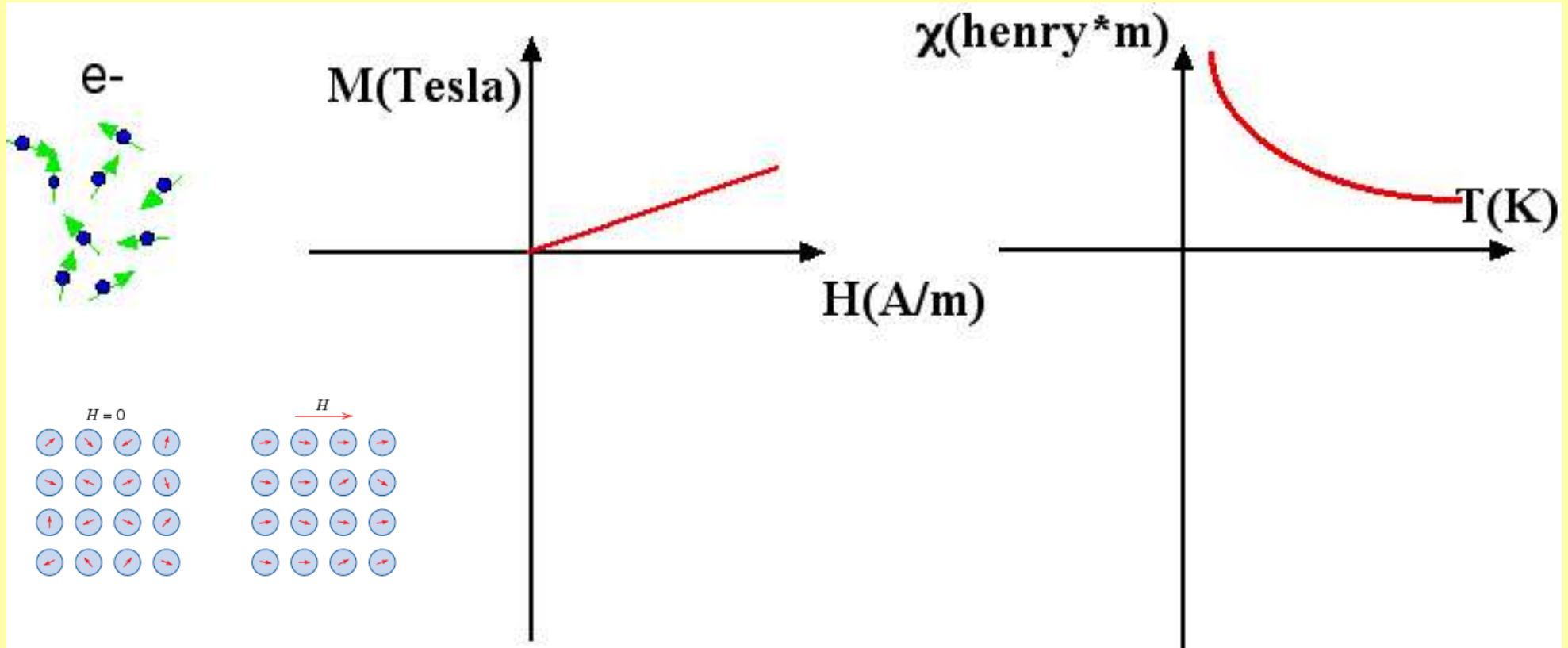
Paramagnetismo

quale e' la causa?

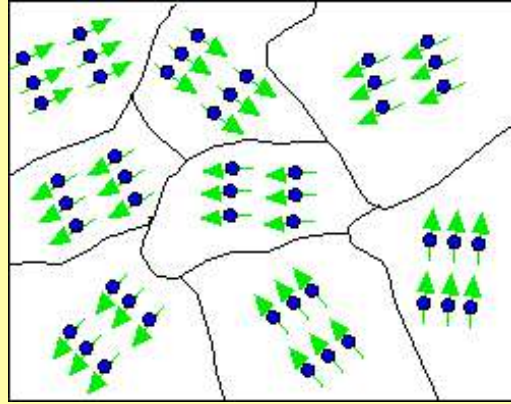
- ✓ Con un campo magnetico le **orientazioni medie degli spin** sono leggermente cambiate:
- ❑ si produce una debole magnetizzazione parallela al campo magnetico applicato
- ❑ La suscettività e' inversamente proporzionale alla temperatura (Legge di Curie): $\chi = C \cdot \text{Cost} / T$

Paramagnetismo

Come va la Magnetizzazione?



Ferromagnetismo



Come si presenta:

- ✓ Ha un momento spontaneo anche quando non e' 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 suscettivita' e' $\chi > 0$ positiva, un effetto grande: $|\chi| \gg 1$

Ferromagnetismo

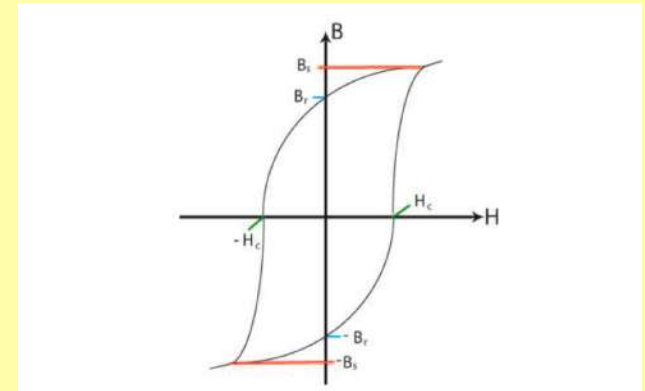
Come si presenta:

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

Ms piccolo --> cuore di trasformatori
Ms grande --> 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 è la causa?

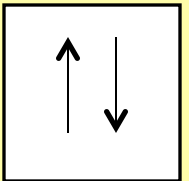
- ✓ L'effetto è basato su un ordine regolare degli spin nella materiale:
- L'ordine tende a minimizzare l'energia d'interazione fra gli spin:

campo di scambio

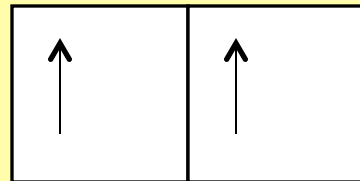
- L'allineamento parallelo degli spin rappresenta lo stato **piu'** favorevole dal punto di vista energetico

- ✓ **L'interazione di scambio** è conseguenza del Principio di esclusione di Pauli (Weiss):

- Due elettroni con spin opposto occupano lo **stesso orbitale**, sono piu' vicini, c'è una **maggiore repulsione** hanno stessa carica elettrica



- Elettroni con **spin uguale** occuperanno **orbitali diversi**; la repulsione Coulombiana sarà inferiore



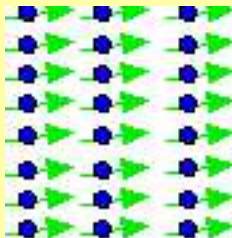
Ferromagnetismo

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

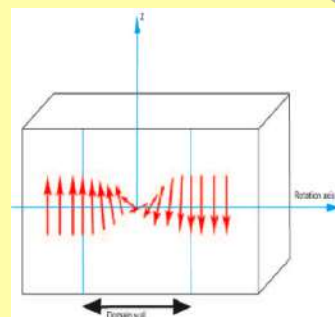
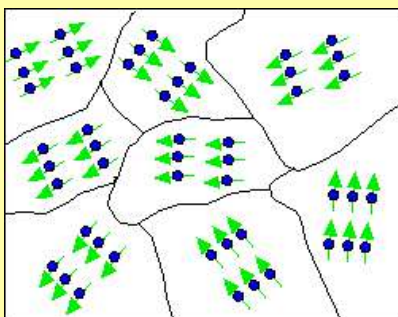
- ✓ L'energia del dominio e' piu' grande rispetto alla energia termica



Ferromagnetismo

Quale è 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



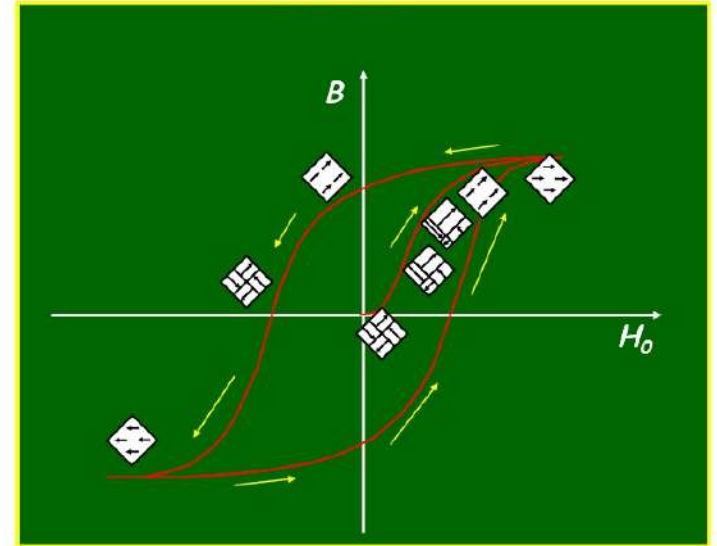
Muri di Bloch

Ferromagnetismo

quale e' la causa?

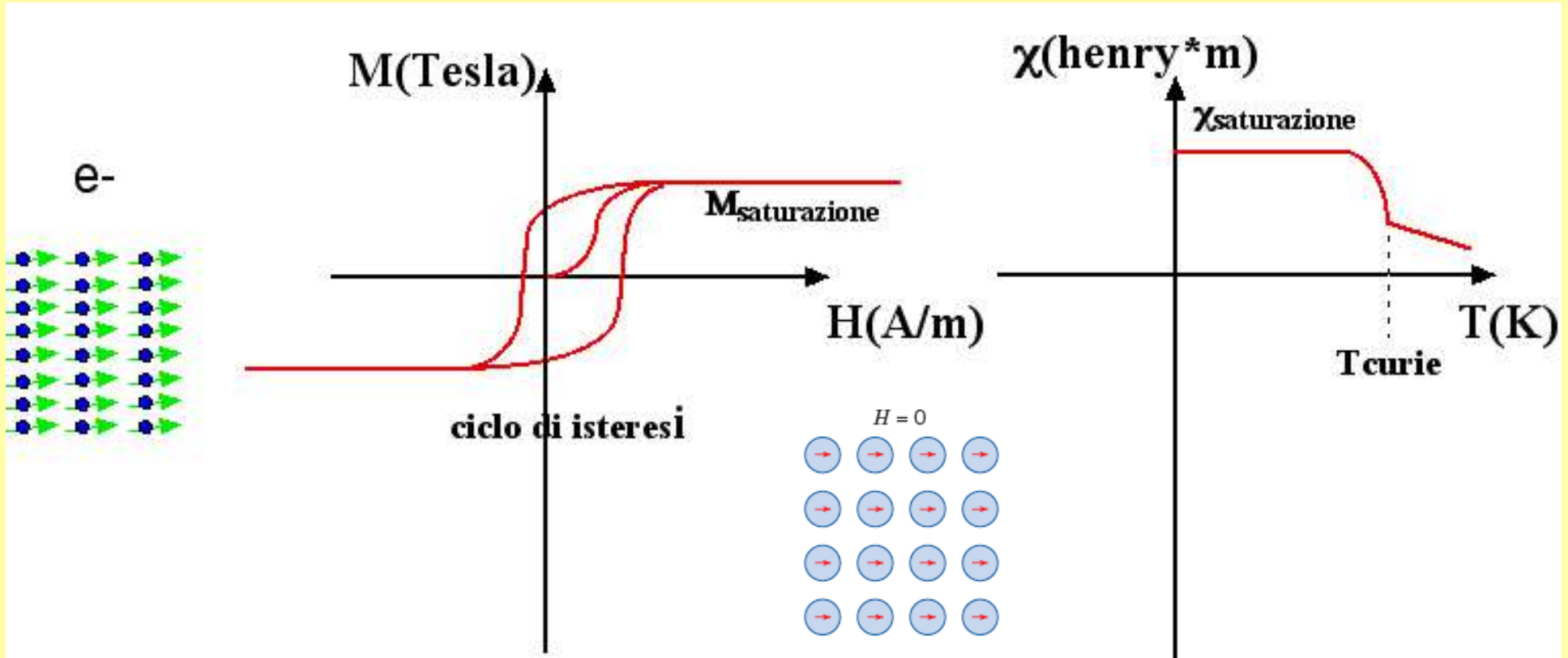
- ❑ A campi alti tutti i domini finiscono per allinearsi ⇒ **Saturazione**
- ❑ Il moto relativo di un dominio rispetto ad un altro presenta viscosita' e questo da ⇒ **Isteresi e Magnetizzazione permanente**
- ✓ Con il crescere della temperatura la struttura di spin e' disturbata dalla agitazione termica. A una data temperatura si rompono i legami dei domini di Weiss ⇒ **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

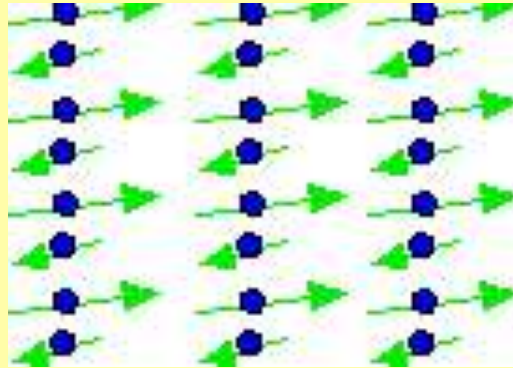
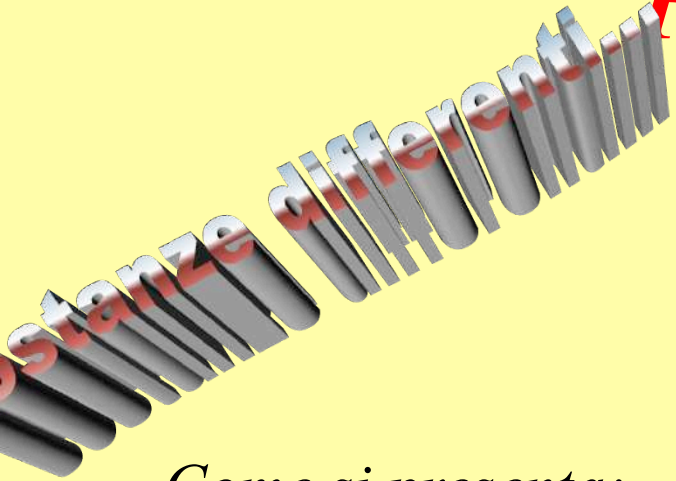


Ferromagnetismo

Come va la Magnetizzazione?



Ferrimagnetismo



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

quale e' la causa?

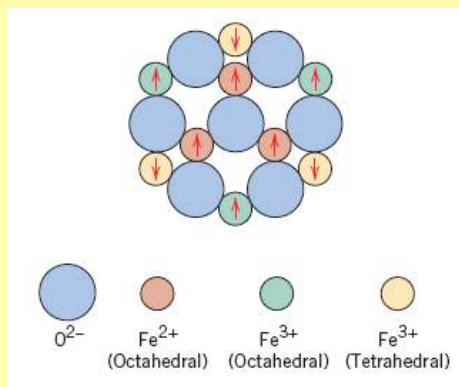
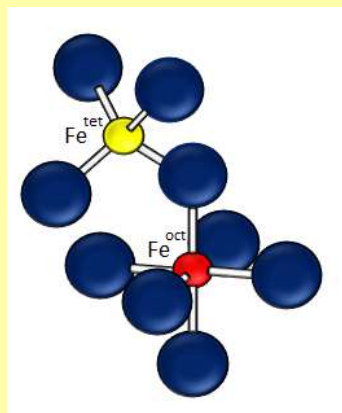
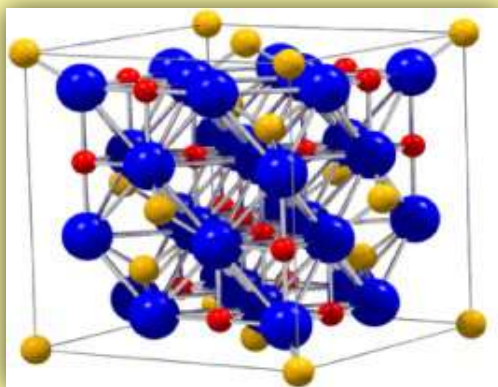


Table 20.3 The Distribution of Spin Magnetic Moments for Fe^{2+} and Fe^{3+} Ions in a Unit Cell Fe_3O_4^a

Cation	Octahedral Lattice Site	Tetrahedral Lattice Site	Net Magnetic Moment
Fe^{3+}	↑ ↑ ↑ ↑	↓ ↓ ↓ ↓	Complete cancellation
Fe^{2+}	↑ ↑ ↑ ↑	—	↑ ↑ ↑ ↑

^a Each arrow represents the magnetic moment orientation for one of the cations.

Ferrimagnetismo

Come va la Magnetizzazione?

