

Laurea Magistrale in Metodologie per la Conservazione e il Restauro dei Beni Culturali

Paolo Prati

*Dipartimento di Fisica, studio S830
Tel. 010-3536439; prati@ge.infn.it*

*Fisica e Metodologie Fisiche
per la Conservazione dei Beni Culturali*

A.A. 2021/2022

Elettrostatica nel vuoto

Come abbiamo visto nella parte di meccanica le forze sono o di contatto (attrito, pressione, forza elastica) o a distanza (gravitazione): osservazioni sperimentali hanno mostrato che esiste un'altra forza a distanza: la forza **elettrica**.

Sperimentalmente si può notare che, ad esempio:

- due oggetti della **medesima sostanza** dopo essere stati strofinati con un panno di lana se posti l'uno vicino all'altro **si respingono**.
- mentre se i due oggetti sono di **sostanze diverse** (es. plastica e vetro) **si possono sia respingere che attrarre**, a seconda delle sostanze (ad es. plastica e vetro si attraggono).

Elettrostatica nel vuoto

Anche le forze di natura elettrica soddisfano il **terzo principio** della dinamica (principio di azione e reazione).

In natura esistono due tipi diversi di **cariche elettriche**:

- per convenzione si dice che sostanze come il vetro, per strofinio con lana, acquistano **carica positiva (sostanze vetrose)**
- sostanze come l'ambra per strofinio acquistano **carica negativa (sostanze resinose)**.

Cariche dello stesso segno si respingono mentre cariche di segno opposto si attraggono.

I costituenti elementari della materia sono protoni, neutroni, elettroni le cui masse sono:

$$m_p = 1,6625 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_e = 9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \simeq \frac{1}{1840} m_p$$

Elettrostatica nel vuoto

Per quanto riguarda le dimensioni, il diametro del protone e del neutrone è dell'ordine di 10^{-15} m, mentre l'elettrone è considerabile puntiforme.

Il protone ha carica elettrica positiva e l'elettrone carica elettrica negativa, fra di loro uguali in valore assoluto.

Fino ad oggi non è stata osservata alcuna carica elettrica che sia una frazione della carica del protone (o elettrone) che perciò può essere considerata come la **carica elementare**, cioè la carica elettrica si presenta come una **grandezza fisica quantizzata**.

Il neutrone, invece, è elettricamente neutro. Gli atomi sono, a meno di condizioni particolari, elettricamente neutri (la carica di un atomo è data dalla somma delle cariche dei protoni ed elettroni che costituiscono l'atomo).

Le sostanze si dividono dal punto di vista elettrico in **materiali isolanti**, in cui le cariche trasferite per strofinio rimangono localizzate, e **materiali conduttori**, in cui le cariche elettriche sono libere di muoversi sulla superficie e all'interno del corpo.



Elettrostatica nel vuoto

Sistema internazionale (SI):

unita' di misura = **coulomb [c]** (derivata dall'ampere $1\text{c} = 1\text{a} \times 1\text{s}$)

carica fondamentale: **$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ c}$**

2 tipi di cariche: positive o negative

elettrone: **$q = - e$**

protone: **$q = + e$**

neutrone: **$q = 0$**

cariche tipiche in laboratorio = **$10^{-8} \text{ c} - 10^{-7} \text{ c}$**

Legge di conservazione della carica elettrica

in un sistema isolato la **somma algebrica delle cariche elettriche si mantiene** costante. Vale anche in relatività e fisica delle particelle

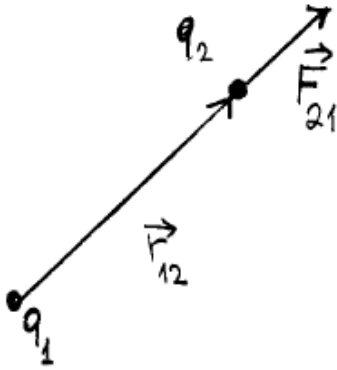
(conservazione delle particelle o creazione di coppie)

Materiali isolanti e conduttori: esempi?

La legge di Coulomb

Siano q_1 e q_2 due cariche puntiformi poste ad una distanza r

nel vuoto, la forza \vec{F}_{21} che la carica q_2 subisce ad opera della carica q_1 è



$$\vec{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12} \quad \vec{r}_{12} = r \hat{r}_{12}$$

dove \hat{r}_{12} è il versore che va dalla carica q_1 alla carica q_2 . k è una costante di proporzionalità (positiva) il cui valore dipende dalle unità di misura.

- * se q_1 e q_2 hanno lo stesso segno la forza è repulsiva
- * se q_1 e q_2 hanno segno opposto la forza è attrattiva.

Nel SI l'unità di carica è il Coulomb C , definito come quella carica che attraversa in un secondo un conduttore percorso dalla corrente di un Ampère (A). Nel SI

$$k \equiv \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.9875 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \quad \epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$$

ϵ_0 = costante dielettrica del vuoto

La legge di Coulomb

La legge di Coulomb è valida (esattamente) per cariche puntiformi.

La legge di Coulomb è formalmente analoga a quella della gravitazione, con la carica elettrica al posto della massa: l'unica differenza è che la massa è solo positiva e quindi la forza gravitazionale è sempre attrattiva.

È utile confrontare le due forze per un elettrone e un protone posti alla distanza r_0

$$F_g = \frac{Gm_em_p}{r_0^2} \quad F_e = \frac{ke^2}{r_0^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{F_e}{F_g} = \frac{ke^2}{Gm_em_p} \simeq 2.2 \cdot 10^{39}$$

Il campo elettrico

Supponiamo che in un punto dello spazio vi sia una carica Q ; se in un altro punto (individuato dal vettore posizione \vec{r} , rispetto a un certo sistema di riferimento) mettiamo un'altra carica q_0 (carica di prova) su questa agisce una forza di natura elettrostatica.

Il Campo Elettrico

Il rapporto \vec{F}/q_0 è indipendente da q_0 e viene detto campo elettrico generato nella posizione \vec{r} dalla carica Q .

$$\vec{E}(\vec{r}) \equiv \vec{E}(x, y, z) = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

(da un punto di vista concettuale la carica di prova q_0 deve tendere a zero in modo che la perturbazione che essa genera sia trascurabile). **Il campo esiste indipendentemente dalla carica di prova:** noto il campo in un punto, la forza su una carica q posta in quel punto è data da $\vec{F} = q\vec{E}$.

Le dimensioni del campo elettrico sono quelle di una forza divisa per una carica e l'unità di misura è:

$$\text{Newton/Coulomb} = \text{Volt/metro}$$

(il Volt verrà introdotto in seguito).

Il Campo Elettrico

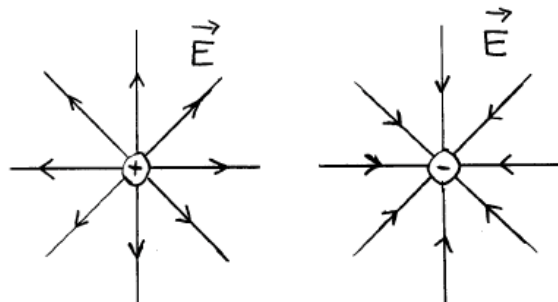
Il campo elettrico è un campo vettoriale: in ogni punto dello spazio è dato da un vettore, il cui modulo dà l'intensità del campo in quel punto. Per rappresentare graficamente un campo elettrico si usano le linee di forza: in ogni punto il campo elettrico è tangente alla linea di forza che passa per quel punto. Inoltre, in ogni regione del campo viene disegnato un numero di linee di forza tale che la loro densità è proporzionale all'intensità del campo.

Le linee di forza hanno origine dalle cariche positive e terminano sulle cariche negative.

Per ogni punto (tranne quelli in cui sono localizzate le cariche) passa una e una sola linea di forza. Il campo generato dalla carica puntiforme Q che supponiamo per semplicità posta nell'origine ha la forma:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{r}$$

$$F = k \frac{q_0 q}{r^2} \hat{u} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r^2} \hat{u}$$



$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = k \frac{q}{r^2} \hat{u}$$

LINEE DI FORZA

Definizione:

linee tali che in ogni punto la tangente coincide con la direzione del campo **E** in quel punto

(verso coincidente col verso di **E**)

Esempio: carica puntiforme **positiva**

Densità n delle linee \propto intensità di **E**

Superficie sferica intorno a una carica puntiforme:

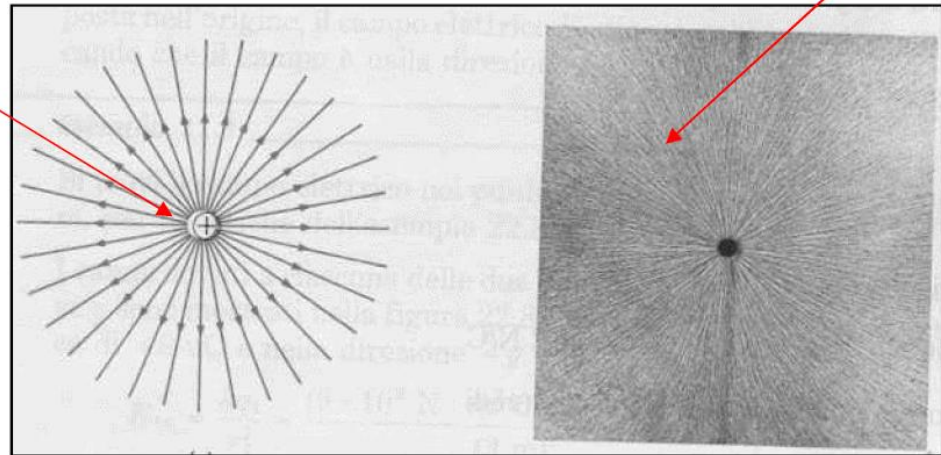
$$A = 4\pi r^2 \quad \Rightarrow \quad n = N/A \propto 1/r^2 \propto E$$

Prescrizioni da osservare:

(**Criterio di Faraday**)

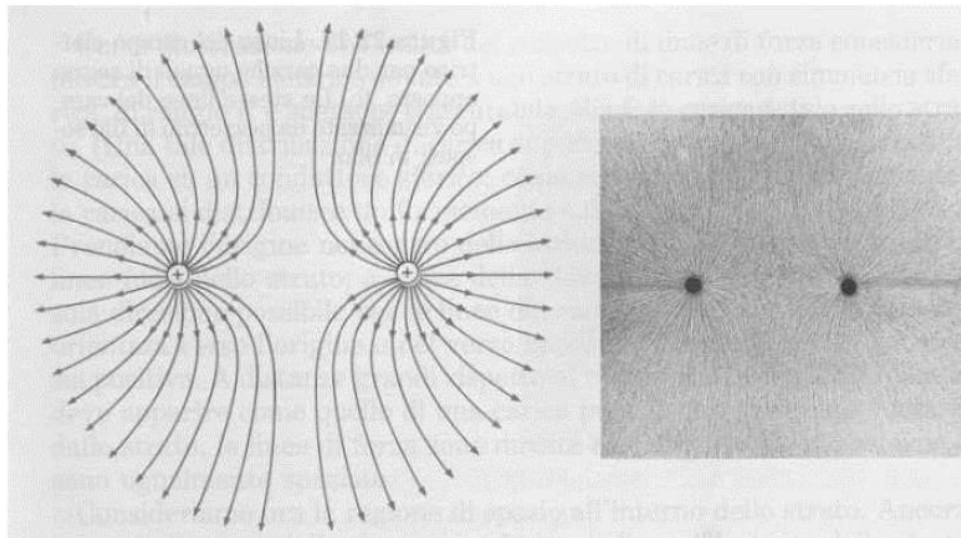
1. generare le linee solo sulle cariche
2. numero di linee proporzionale alla carica
3. disposizione simmetrica

pezzetti di filo
sospesi in olio

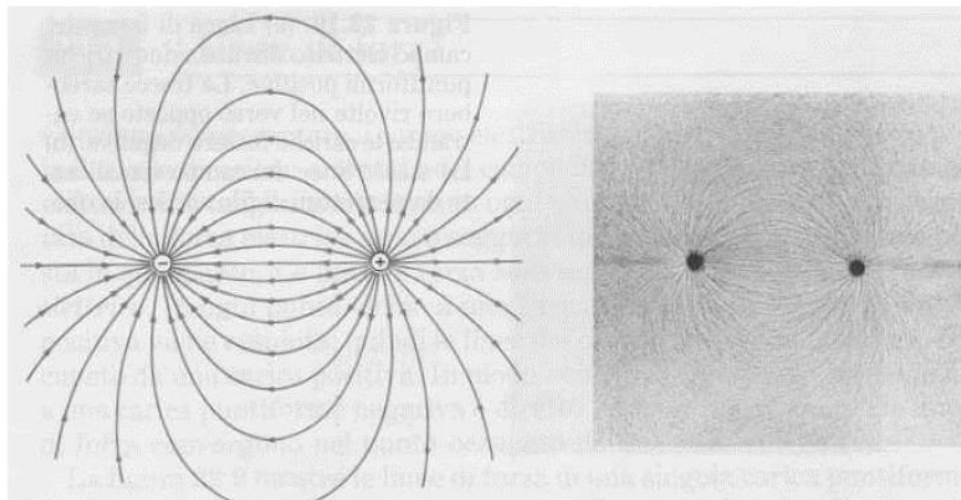


LINEE DI FORZA

Esempio:
2 cariche puntiformi eguali **positive**



Esempio:
2 cariche uguali
e **opposte** in segno (**dipolo**)

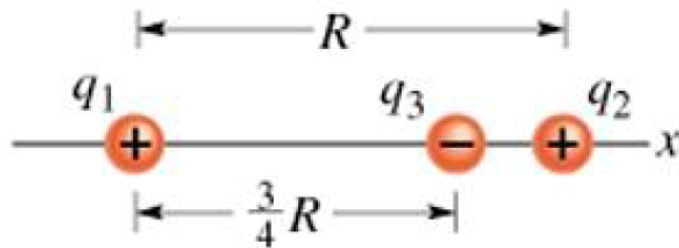


Esempio

Tre cariche fisse q_1 , q_2 , q_3 sono collocate sull'asse x .

$$q_1 = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}, \quad q_2 = 3.2 \cdot 10^{-19} \text{ C}, \quad q_3 = -3.2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

q_1 e q_2 sono poste alla distanza $R = 0.02 \text{ m}$, mentre q_3 si trova tra di loro, alla distanza $\frac{3}{4} R$ da q_1 . **Calcolare la forza elettrostatica \mathbf{F}_1** agente sulla carica q_1 per effetto della altre due.



La forza \mathbf{F}_1 è data dalla somma (vettoriale) delle forze elettrostatiche \mathbf{F}_{12} e \mathbf{F}_{13} , che sono esercitate su q_1 rispettivamente dalle cariche q_2 e q_3 . Consideriamo per prima la forza \mathbf{F}_{12} e calcoliamone il modulo attraverso la legge di Coulomb:

$$\begin{aligned} |\mathbf{F}_{12}| &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1| |q_2|}{R^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2 \cdot \frac{(1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (3.2 \cdot 10^{-19} \text{ C})}{(0.02 \text{ m})^2} = \\ &= 1.15 \cdot 10^{-24} \text{ N} \end{aligned}$$

La forza \mathbf{F}_{12} è di tipo repulsivo, dato che le cariche q_1 e q_2 sono di uguale segno, ed è pertanto diretta nel verso negativo dell'asse x .



Consideriamo ora la forza \mathbf{F}_{13} , il cui modulo è uguale a:

$$|\mathbf{F}_{13}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1| |q_3|}{\left(\frac{3}{4}R\right)^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2 \cdot \frac{(1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (3.2 \cdot 10^{-19} \text{ C})}{(0.75 \cdot 0.02 \text{ m})^2} =$$

$$= 2.05 \cdot 10^{-24} \text{ N}$$

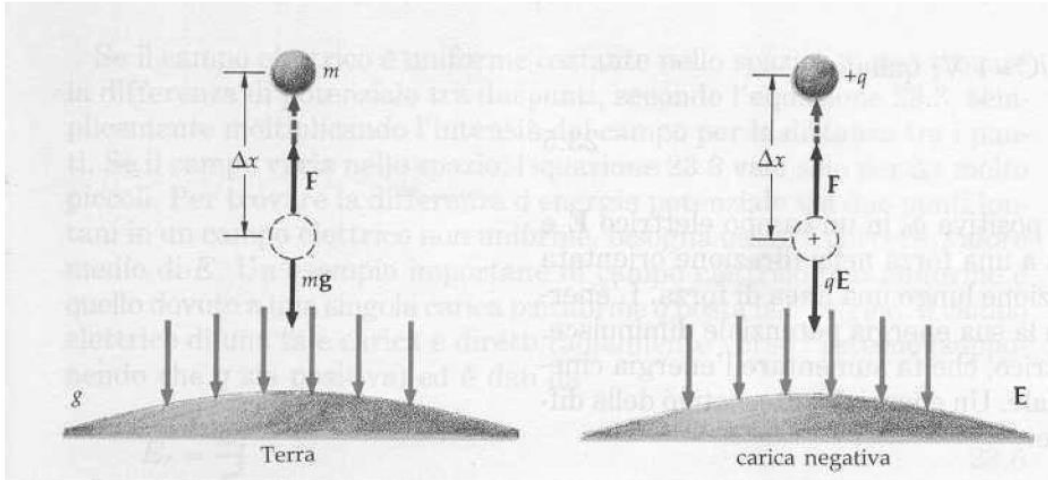


La forza \mathbf{F}_{13} è di tipo attrattivo, dato che le cariche q_1 e q_3 sono di segno opposto, ed è pertanto diretta nel verso positivo dell'asse x .

La forza $\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13}$ è diretta lungo l'asse x , nel verso positivo (dato che il modulo di \mathbf{F}_{13} è maggiore di quello di \mathbf{F}_{12}); il modulo di \mathbf{F}_1 è uguale a:

$$|\mathbf{F}_1| = (2.05 - 1.15) \cdot 10^{-24} \text{ N} \cong 9 \cdot 10^{-25} \text{ N}$$

ENERGIA POTENZIALE ELETTROSTATICA



E' analogo al caso gravitazionale
in cui $E = mg$

Lavoro compiuto da F_{ext}

$$L_{\text{ext}} = F_{\text{ext}} \cdot \Delta x = F_{\text{ext},x} \Delta x = -q_0 E_x \Delta x \quad (L_{\text{ext}} = -L_{\text{campo}})$$

Aumento di energia potenziale della carica:

$$\Delta U = L_{\text{ext}} = -q_0 E_x \Delta x$$



Energia potenziale \propto carica esploratrice

Caso di campo E uniforme (quello della figura): energia potenziale definita a meno di una costante: (livello di altezza 0)

POTENZIALE ELETTRICO

Differenza di potenziale $\Delta V =$ differenza di energia potenziale elettrostatica riferita all'unità di carica

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q_0} = -E_x \Delta x$$

(indipendente dalla carica esploratrice)

•Unità di misura SI: il Volt

$$1 \text{ V} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}}$$



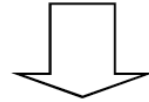
Riespressione dell'unità del campo elettrico

$$1 \frac{\text{N}}{\text{C}} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{C} \cdot \text{m}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C} \cdot \text{m}} = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

POTENZIALE ELETTRICO

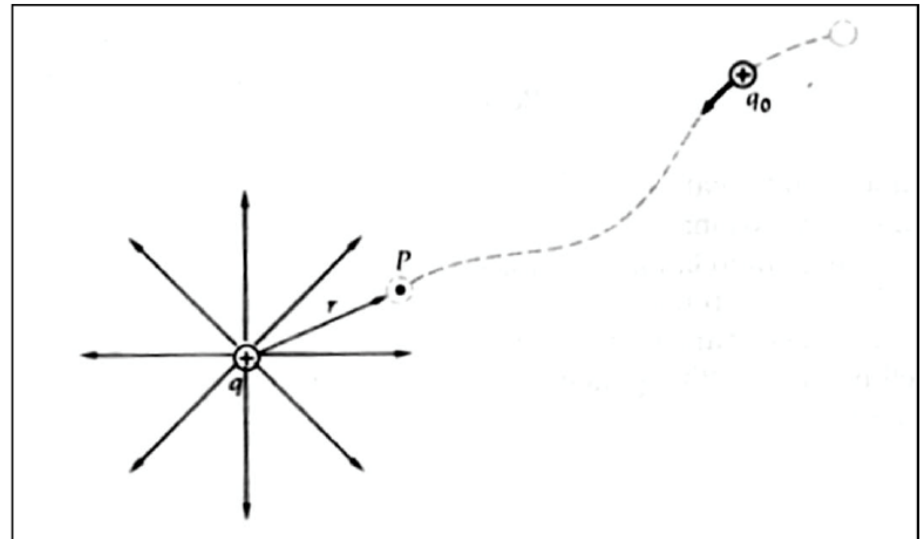
Campo da carica puntiforme:

$$E_r = k \frac{q}{r^2} \Rightarrow V = k \frac{q}{r} \quad (V=0 \text{ per } r=\infty)$$



U rappresenta effettivamente il lavoro necessario per formare il sistema delle 2 cariche (**V** il lavoro per una carica di prova unitaria)

$$U = q_0 V = k \frac{qq_0}{r} \quad \text{con } U=0 \text{ per } r=\infty$$

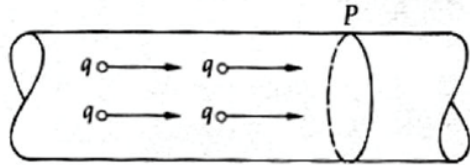


Unità di misura speciale (non SI): l'**elettronvolt** (eV)

$$U = q V \Rightarrow 1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1\text{V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\Delta U = L_{\text{ext}} = -q_0 E_x \Delta x$$

CORRENTE ELETTRICA



Δq attraversa la superficie in Δt

Intensità di corrente: $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$

Unità di misura SI: **l'Ampere** (grandezza fondamentale)

$$1\text{A} = \frac{1\text{C}}{1\text{s}} \Rightarrow 1\text{C} = 1\text{A} \times 1\text{s}$$

Verso convenzionale della corrente: **quello delle cariche +**
(il moto reale degli elettroni è in verso opposto)
moto di cariche – o di cariche + equivalenti, in generale

LEGGE DI OHM

Leggi empiriche per il comportamento dei materiali
appliciamo una ΔV (o un campo **E**, che è lo stesso):

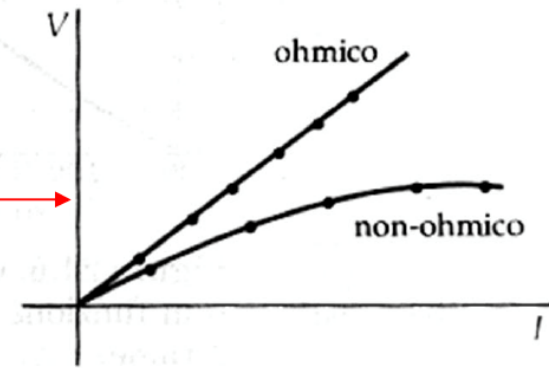
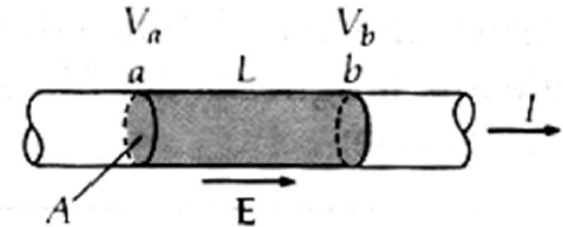
La **corrente che si genera** è: $I = \frac{V}{R}$

cioè $I \propto V$, con coefficiente di proporzionalità $1/R$

quindi gli oggetti possiedono una **resistenza elettrica R**: $R = \frac{V}{I}$

unità di misura SI, l'**Ohm** (Ω): $1\Omega = \frac{1V}{1A}$

N.B. ci sono anche materiali che **non** seguono la legge di **Ohm**



LEGGE DI OHM

La resistenza di un oggetto dipende da:

- le sue caratteristiche **geometriche** (L,A)
- il **materiale** (ρ)

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (\text{II LEGGE DI OHM})$$

ρ = **resistività** elettrica del materiale
 unita' di misura si: $\Omega \cdot m$

Cavi elettrici fatti di rame
 anche perché **duttile e per il prezzo**

Conduttori

Semiconduttori

Isolanti

Tabella 24.1
 Resistività e coefficienti di temperatura

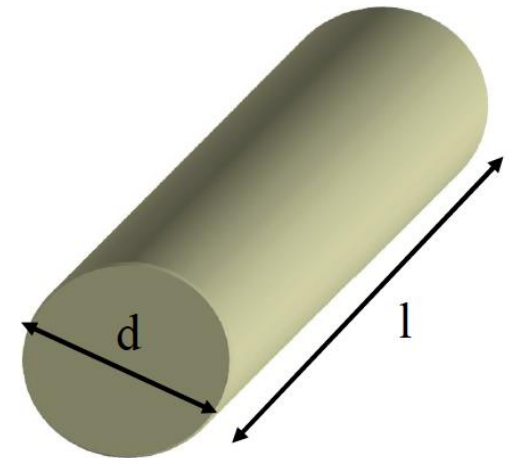
Materiale	Resistività ρ a 20 °C, $\Omega \cdot m$
argento	$1,6 \cdot 10^{-8}$
rame	$1,7 \cdot 10^{-8}$
alluminio	$2,8 \cdot 10^{-8}$
tungsteno	$5,5 \cdot 10^{-8}$
ferro	$10 \cdot 10^{-8}$
piombo	$22 \cdot 10^{-8}$
mercurio	$96 \cdot 10^{-8}$
nichelcromo	$100 \cdot 10^{-8}$
carbonio	$3500 \cdot 10^{-8}$
germanio	0,45
silicio	640
legno	$10^8 \div 10^{14}$
vetro	$10^{10} \div 10^{14}$
ebanite	$10^{13} \div 10^{16}$
ambra	$5 \cdot 10^{14}$
zolfo	10^{15}

Esempio

Un conduttore per alta tensione è formato da un filo di rame del diametro di 1 cm ed è lungo 20 km. Calcolare la sua resistenza R e l'intensità della corrente I che lo attraversa, sapendo che la differenza di potenziale ai suoi estremi è di 20000 V e che la resistività ρ del rame è pari a $1.7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$.

Usando la seconda legge di Ohm, dove S indica la sezione del filo trovo R :

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{(1.7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m)(2 \cdot 10^4 m)}{\pi \cdot (0.005 m)^2} =$$
$$= 4.33 \Omega$$

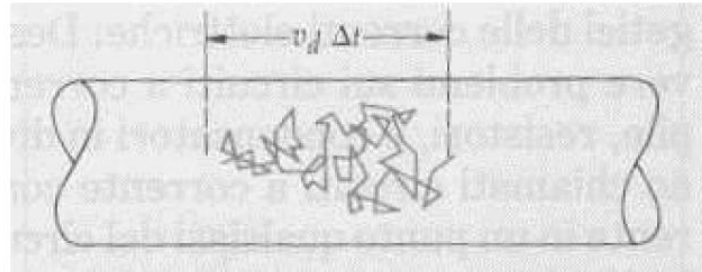


Dalla prima legge di Ohm segue poi:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{20000 V}{4.33 \Omega} = 4619 A$$

ENERGIA NEI CIRCUITI (EFFETTO JOULE)

Filo sottoposto a una ΔV :
moto microscopico degli elettroni:

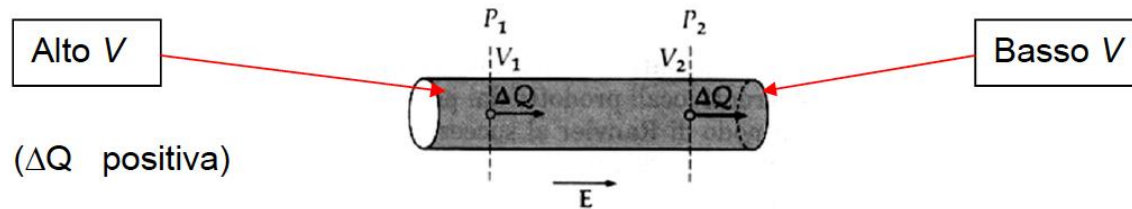


Moto uniformemente accelerato + urto \rightarrow moto uniformemente accelerato + urto ecc. \rightarrow



In **media** equivale a moto uniforme con velocita' v_d

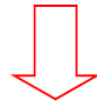
Analisi Energetica:



ENERGIA NEI CIRCUITI (EFFETTO JOULE)

Energia potenziale diminuisce, ma energia cinetica non aumenta.

Dove va l'energia?



Energia Termica (urti)

=

Effetto Joule

$$\Delta U = L_{\text{ext}} = -q_0 E_x \Delta x$$

Energia dissipata:

$$\Delta U = \Delta Q (V_1 - V_2) = \Delta Q \cdot V \quad (V = \text{diminuzione del potenziale})$$

Rapidità con cui viene persa l'energia ($P =$ **Potenza dissipata**):

$$P = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{\Delta V \cdot Q}{\Delta t} = I \cdot V$$

I in Ampere e V in Volt



P in Watt

Per conduttori ohmici:

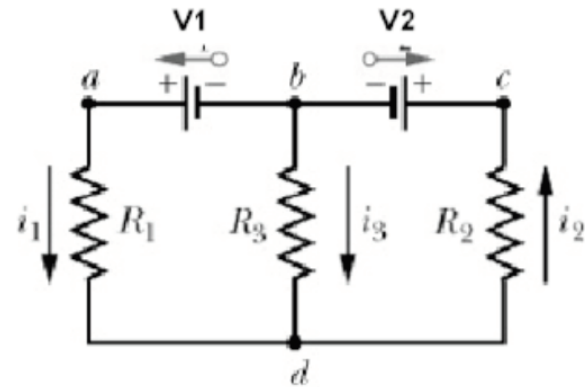
altre 2 leggi equivalenti

$$P = I^2 R \quad \text{e} \quad P = \frac{V^2}{R}$$

Corrente Continua e Alternata

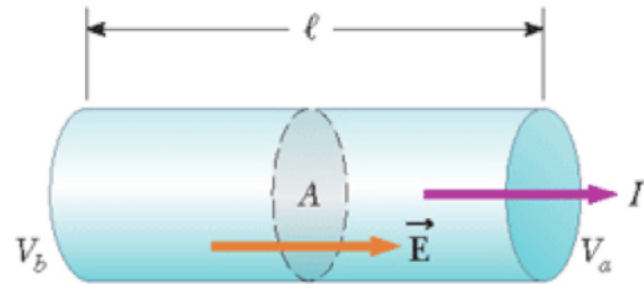
- Corrente Continua (CC o DC, Direct Current):
corrente il cui verso non varia nel tempo. E' la corrente prodotta dalle batterie, quella che scorre nei dispositivi elettronici.
- Corrente Alternata (CA o AC, Alternating Current):
il verso della corrente varia periodicamente nel tempo, con una legge $I = I_0 \sin(2\pi ft)$, dove f è la *frequenza*. E' la corrente prodotta dalle centrali elettriche, con frequenza $f = 50$ Hz in Europa, $f = 60$ Hz negli Stati Uniti.

Nel seguito ci occuperemo solo di *circuiti a corrente continua*, alimentati da una batteria o *generatore di differenza di potenziale* (o più d'una, o anche nessuna)



Resistori

Si osserva (e si può dimostrare) che per una geometria come quella mostrata in figura, la resistenza vale $R = \frac{\rho l}{A}$,



dove ρ dipende *solo* dalle caratteristiche del materiale. ρ può variare di *parecchi ordini di grandezza* fra i migliori e i peggiori conduttori.

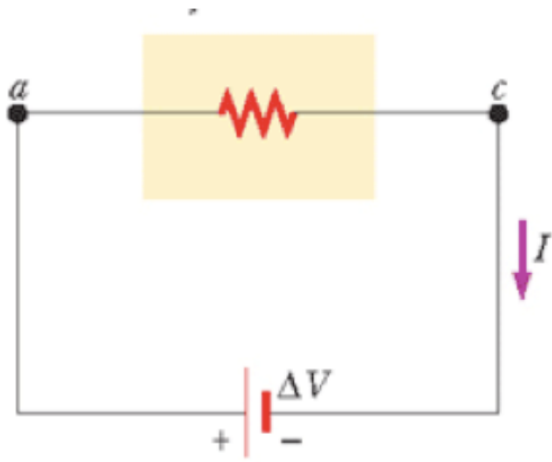
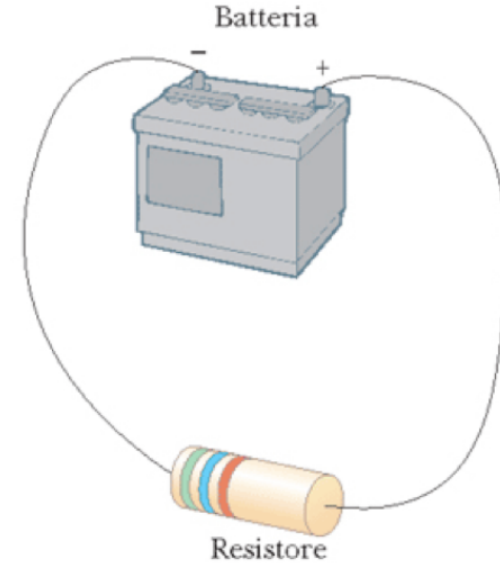
Un elemento tipico di circuito è il cosiddetto *resistore*, o *resistenza*. Un codice a barre colorate ne indica il valore R e la sua tolleranza (10%, 5%,...). Un resistore è indicato dal simbolo a destra.



Resistori tipicamente usati in circuiti elettronici variano da pochi Ω a migliaia di Ω (kiloohm, $k\Omega$), fino al milione di Ω (megaohm, Ω).

Generatori di differenza di potenziale

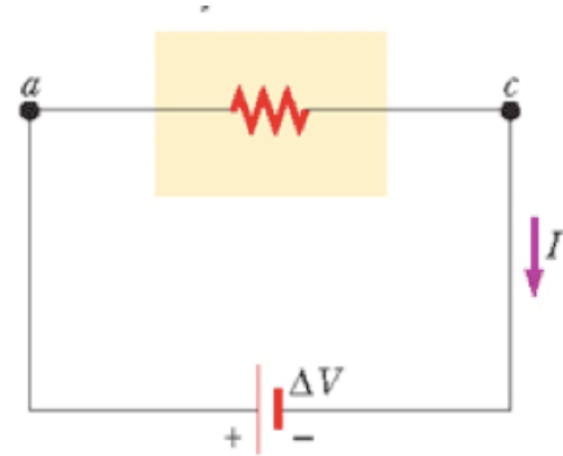
Perché una corrente continui a circolare in un circuito occorre la presenza di un *generatore di differenza di potenziale*, o d.d.p.: un dispositivo (una batteria) che tramite reazioni elettrochimiche fornisce energia alle cariche.



Il circuito essenziale qui sopra: una resistenza connessa ad un generatore di d.d.p., è schematizzato qui a destra. Notate il simbolo convenzionale il generatore di d.d.p.: il lato marcato con + si trova ad un potenziale più alto di ΔV (positivo) del lato -

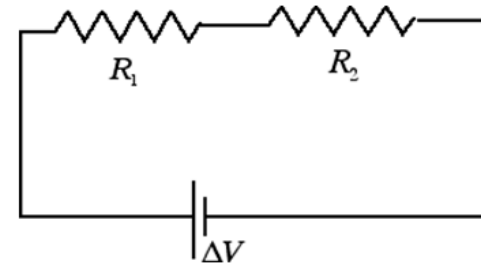
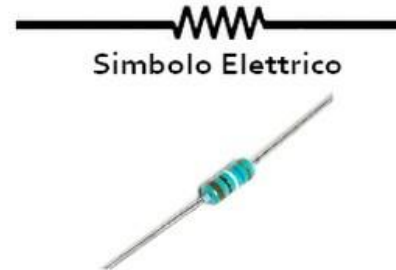
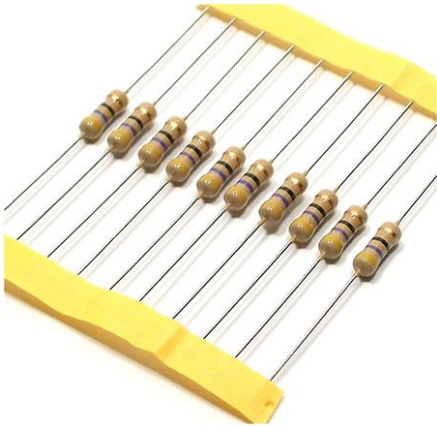
Analisi di un circuito elementare

- La corrente I scorre da dove il potenziale è alto a dove è basso...
- ...gli elettroni fanno il percorso inverso! ma non ce ne curiamo: conviene scegliere il senso di I come in figura.



- Anche i collegamenti fra i vari elementi di circuiti (i fili metallici) hanno una resistenza, ma di solito è trascurabile.
- Anche la batteria è un conduttore, ma ha una piccola *resistenza interna*, nulla solo per un generatore ideale; trascuriamo anche questa. Se nota, la resistenza interna può essere aggiunta al circuito in serie alla batteria.
- Se R è la resistenza, la corrente $I = \Delta V/R$, per la legge di Ohm. Il potenziale in a è ΔV più alto che in c .

Resistenze (resistori) in Serie



Circuito con resistori in Serie

Resistenze in Serie

sottoponendo tre resistenze R_1 , R_2 , R_3 a una tensione V , ho d.d.p. V_{R_1} , V_{R_2} , V_{R_3} diverse tra di loro. Le R_i sono attraversate dalla stessa corrente

$$I = I_{R_1} = I_{R_2} = I_{R_3}$$

Quindi: V_{R_1} diverso da V_{R_2} diverso da V_{R_3}
La tensione totale del circuito sarà quindi :



$$V = V_{R_1} + V_{R_2} + V_{R_3} \quad (\text{secondo la legge di Ohm: } V = R \cdot I)$$

$$R_t(\text{otale}) \cdot I = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + R_3 \cdot I \quad (\text{raccogliendo a fattor comune})$$

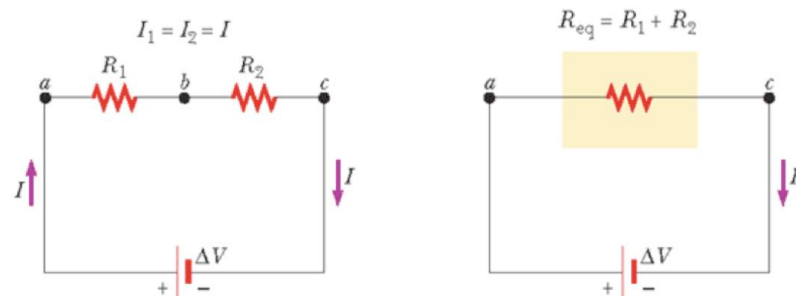
$$R_t \cdot I = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot I$$

(dividendo ambo i membri per I)

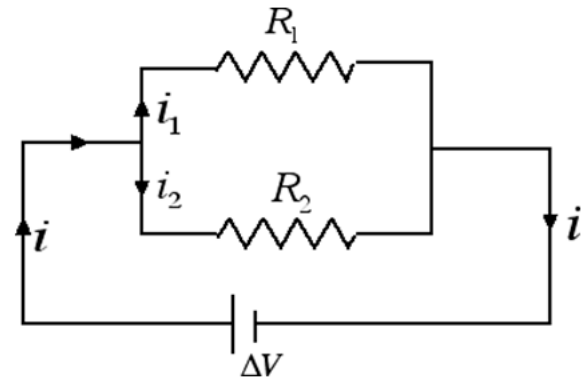
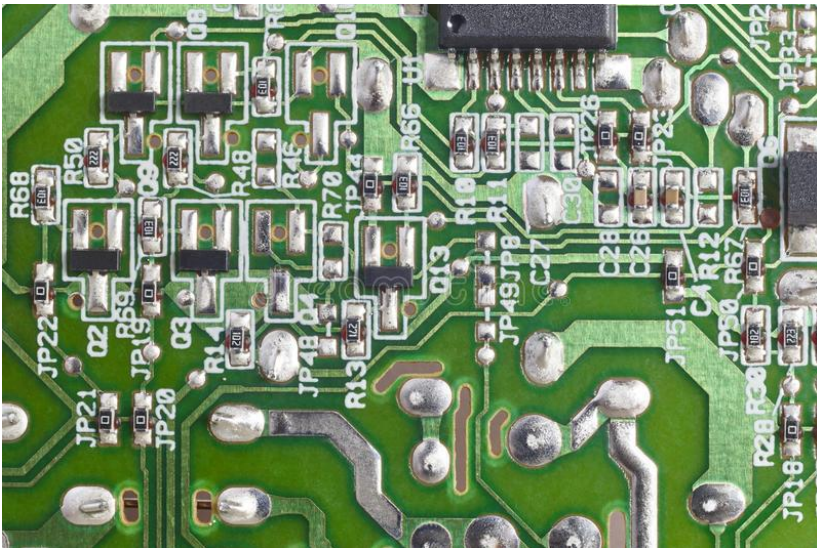
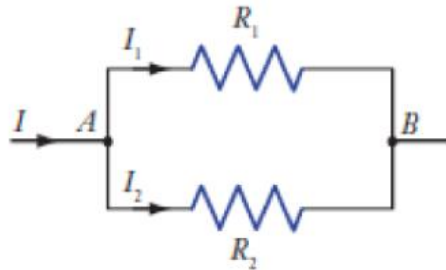
$$R_t = R_1 + R_2 + R_3$$

Concludendo, quindi, un circuito in cui sono presenti più resistenze in serie, può essere semplificato con un'unica resistenza uguale alla somma di tutti i valori delle resistenze stesse:

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$



Resistenze in Parallelo



sottoponendo tre resistenze R_1 , R_2 , R_3 a una tensione V , ho d.d.p. V_{R_1} , V_{R_2} , V_{R_3} eguali tra di loro. Le R_i sono attraversate da diverse correnti tali che la corrente che entra I sia eguale alla somma delle uscenti (come in un **fiume che si divide in tre parti**)

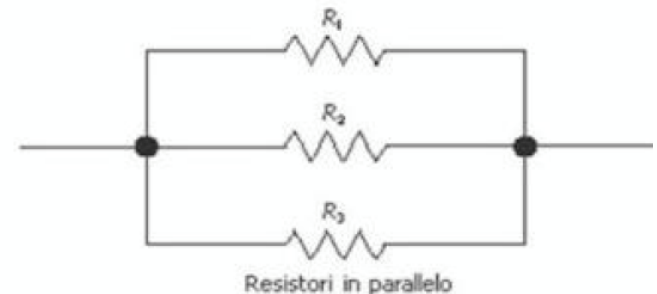
$$I = I_{R_1} + I_{R_2} + I_{R_3}$$

(secondo la legge di Ohm $I=V/R$) $V/R_t = V/R_1 + V/R_2 + V/R_3$:

(raccogliendo a fattor comune) $V/R_t = (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3) \cdot V$

(dividendo ambo i membri per V)

$$1/R_t = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$$



Concludendo, quindi, un circuito in cui sono presenti più di tre resistenze in parallelo, può essere semplificato con un'unica resistenza equivalente utilizzando la seguente formula generale:

$$1/R_t = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots + 1/R_n$$

Esempio

Se hai più lampadine collegate in serie, cosa succede se una di esse si fulmina?

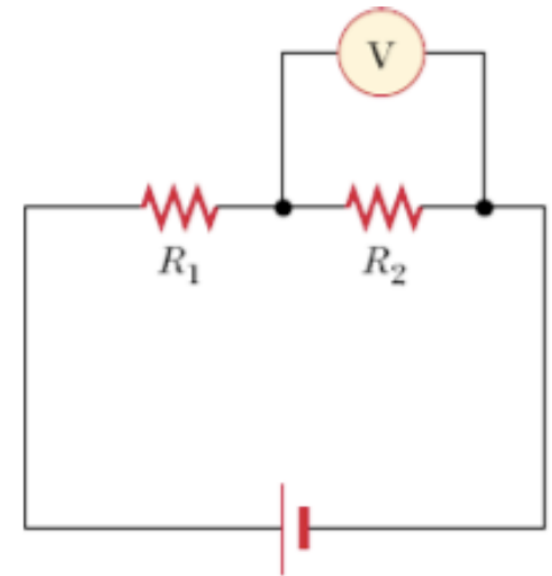
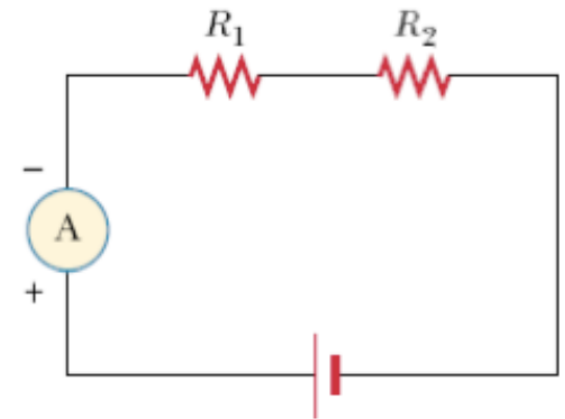
1) Si spegne la lampadina fulminata.

2) Si spengono anche le lampadine buone.

3) Si accendono più forte le lampadine buone

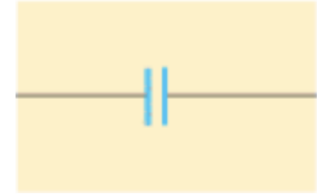
Amperometri e Voltmetri

- Un *amperometro* misura la corrente che scorre in un circuito. Deve essere montato in serie. Per non perturbare il sistema sotto misura, l'amperometro ideale dovrebbe avere resistenza interna nulla; di fatto gli amperometri reali hanno resistenza interna finita ma piccola.
- Un *voltmetro* misura la differenza di potenziale fra due punti di un circuito. Deve essere montato in parallelo. Per non perturbare il sistema sotto misura, il voltmetro ideale dovrebbe avere resistenza interna infinita; di fatto i voltmetri reali hanno una resistenza interna finita ma grande.



Condensatori

- Un altro elemento di circuito molto comune è il *condensatore*



- Il condensatore è caratterizzato dalla seguente relazione fra potenziale

e carica immagazzinata:
$$V = \frac{Q}{C}$$

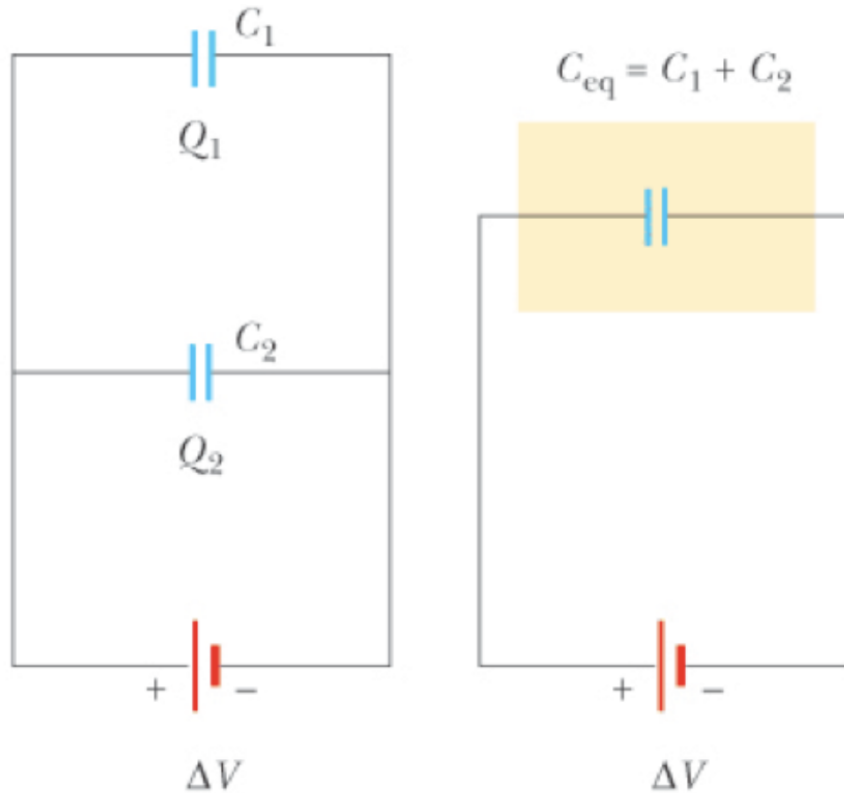
- Il condensatore *non* conduce corrente, a meno che non sia guasto! Il condensatore *accumula carica*, di segno opposto sulle due armature

- Relazione fra carica e corrente:

$$\frac{dQ}{dt} = I$$
. Le leggi di Kirchhoff rimangono valide, ma producono equazioni differenziali assai più complicate da risolvere.

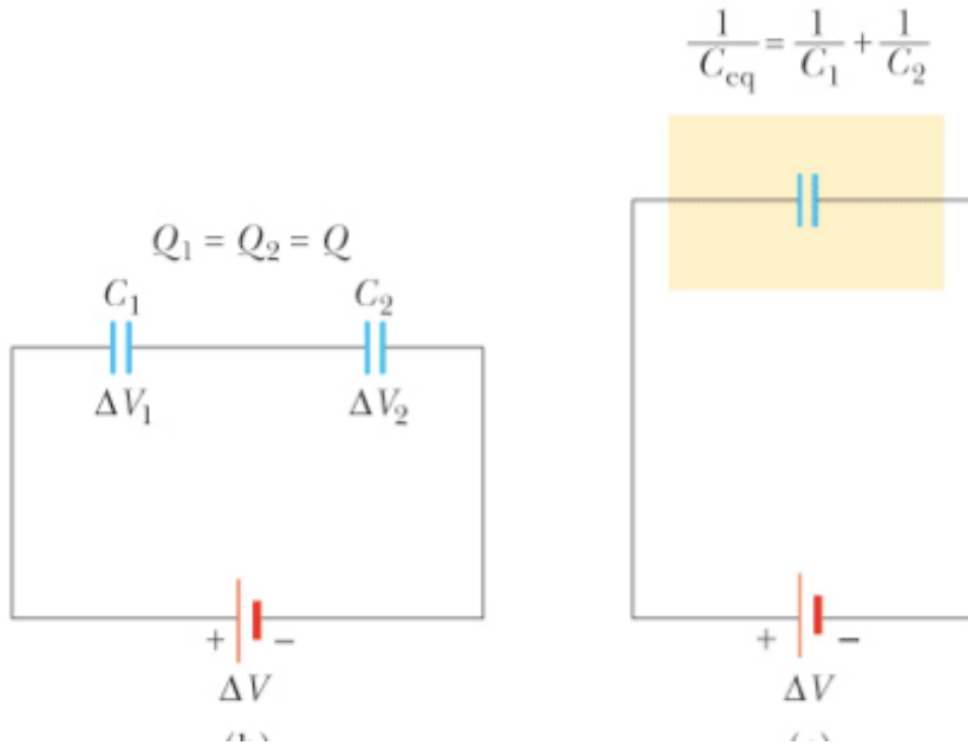
Condensatori in parallelo

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V$$



Per due condensatori C_1 e C_2 in parallelo, abbiamo $V_1 = V_2$ e $Q_1 = C_1V$, $Q_2 = C_2V$, da cui $Q = Q_1 + Q_2 = (C_1 + C_2)V$, ovvero $C_{eq} = C_1 + C_2$.

Condensatori in serie



In questo caso, abbiamo che $Q_1 = Q_2 = Q$ da cui $V_1 = Q/C_1$, $V_2 = Q/C_2$, da cui $V = V_1 + V_2 = Q(1/C_1 + 1/C_2)$, ovvero $1/C_{eq} = 1/C_1 + 1/C_2$.

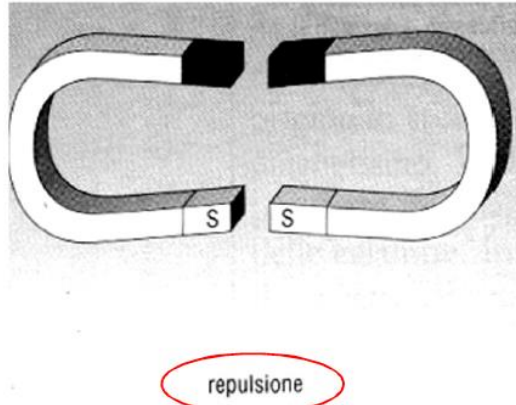
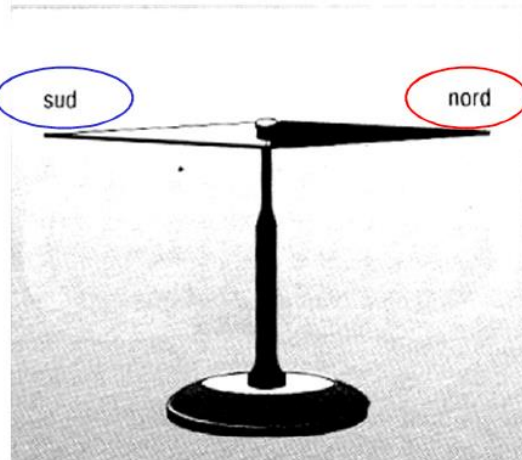
Notate come i condensatori in serie si comportino come le resistenze in parallelo, e viceversa.

Campo magnetico

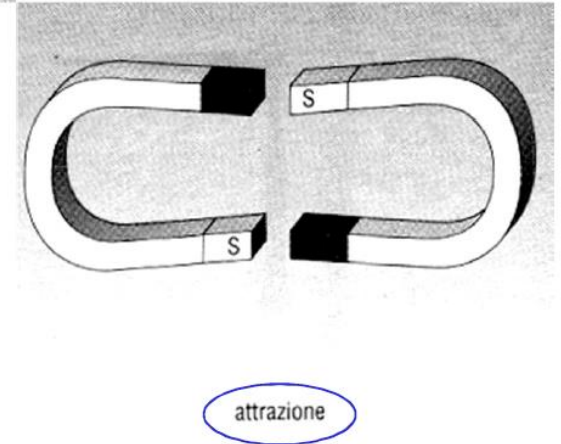
- Magnetismo noto ad antichi greci (magnetite)
- 1269 ago bussola (poli magnetici in analogia con poli terrestri)
- Gilbert (1540-1603) capisce perché ago si orienta (terra è magnete permanente polo Nord è polo Sud magnetico)
- e capisce differenza tra forza ed attrazione elettrica e polo magnetico.

CAMPO MAGNETICO

Noto fin dall'antichità (proprietà della magnetite)
polo **S** e polo **N** magnetico (dall'orientamento sulla superficie terrestre)



Poli **opposti** si **attraggono**,
poli **identici** si **respingono**

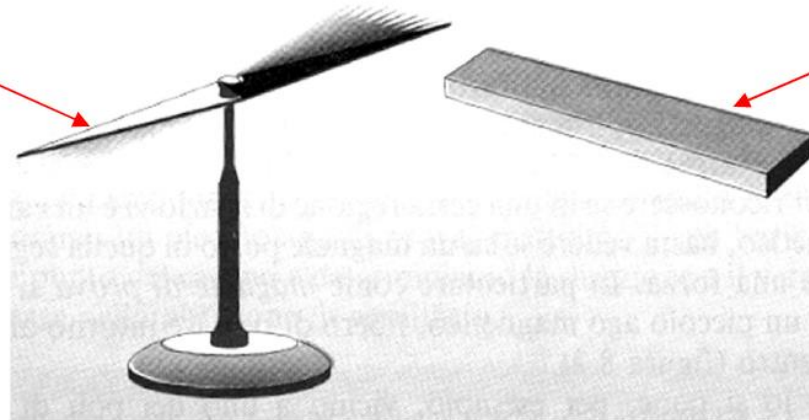


CAMPO MAGNETICO

Interpretazione moderna: proprietà dello spazio

Magnete rivelatore del campo

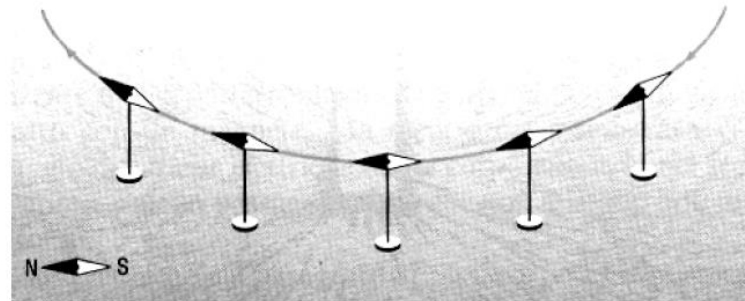
Magnete sorgente del campo



- Definizione del vettore **B**:
direzione e verso: quelle dell'ago magnetico (da S a N)
- Modulo:
osservazione **sperimentale** per **una carica in moto in un campo **B****:
compare una forza (**Forza di Lorentz**)

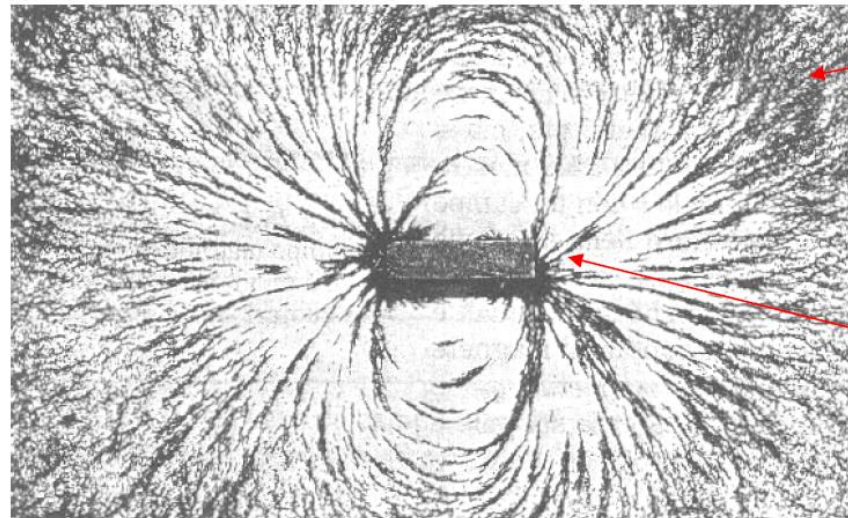
CAMPO MAGNETICO

Linee di forza: identiche al caso elettrico
Tangenti alla direzione del campo **B**
Ma sono sempre linee chiuse



Densità linee \propto Intensità campo

Magnete a sbarra:

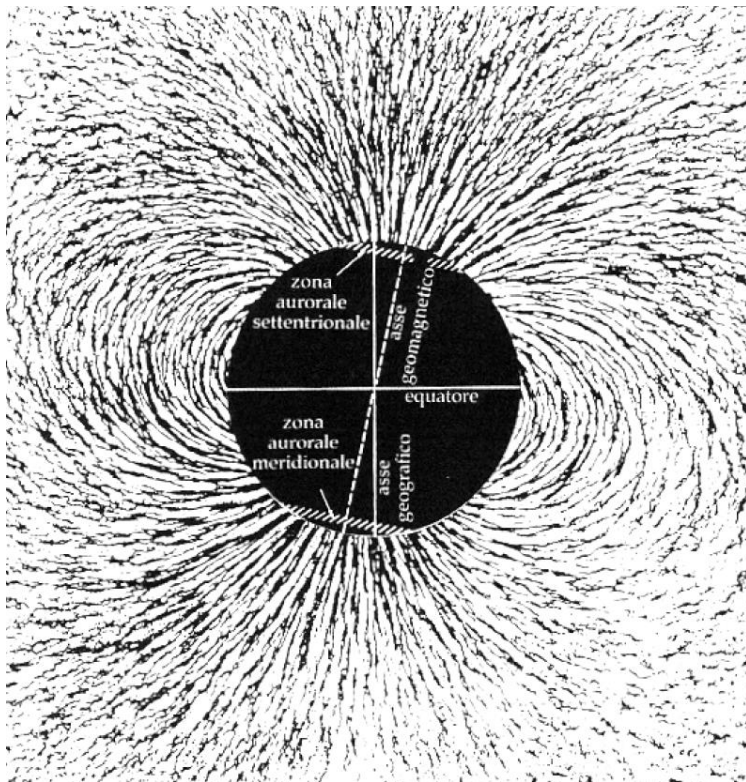


Limatura di Ferro

Zona ad alta intensità di **B**

Orientazione: **escono dal polo N ed entrano nel polo S**

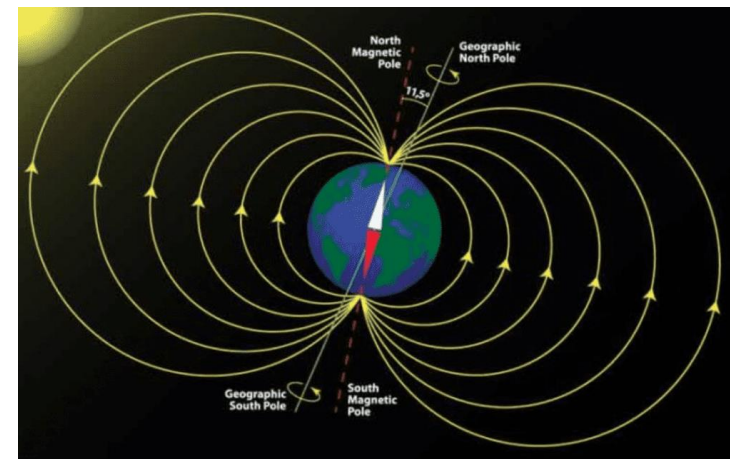
CAMPO MAGNETICO



Altro esempio di **magnete permanente**

La Terra

Intensità $\approx 1G$



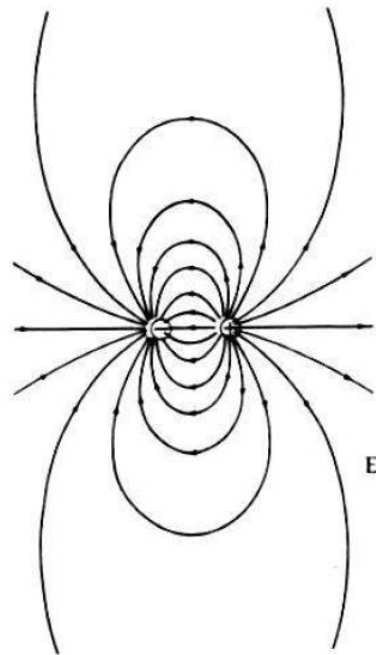
CAMPO MAGNETICO

No poli magnetici isolati: linee di forza chiuse

Unità fondamentale generatrice del campo **B**

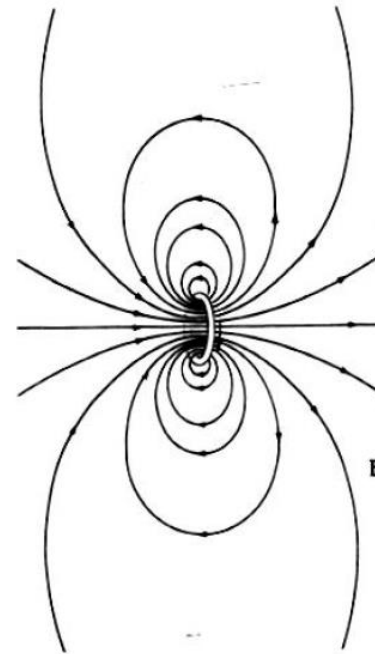
= Spira (dipolo magnetico)

Caso
Elettrico



(a)

Caso
Magnetico

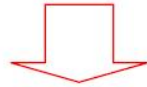


(b)

materiali si dividono in **diamagnetici**, **paramagnetici** e **ferromagnetici** a seconda di come si comportano le loro molecole in presenza di **B** esterno (lo contrastano, lo lasciano invariato o lo aumentano) . Fenomeni complessi da studiare. Dipendono da proprietà molecole, da temperatura, etc. Utilizzo in magneti permanenti

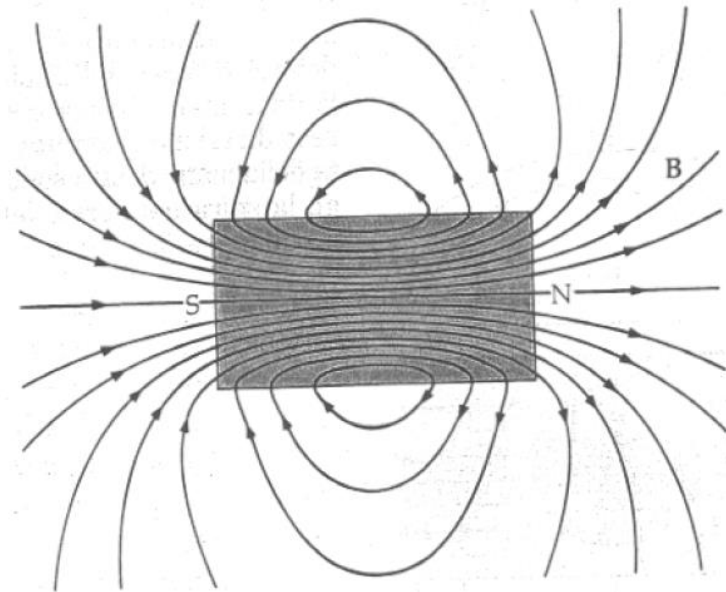
CAMPO MAGNETICO

Non ci sono punti in cui vengono generate linee di campo
non ci sono sorgenti di sorgenti **B**



LINEE DI CAMPO = CURVE CHIUSE (SEMPRE)

•Esempio del magnete a sbarra:

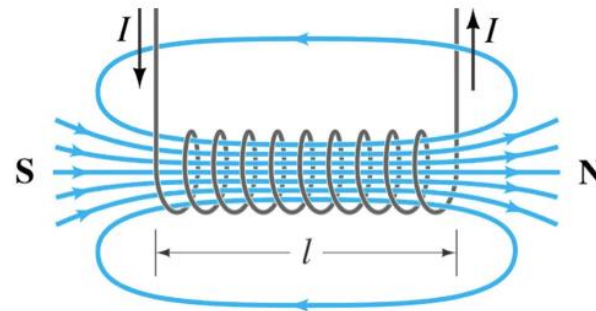
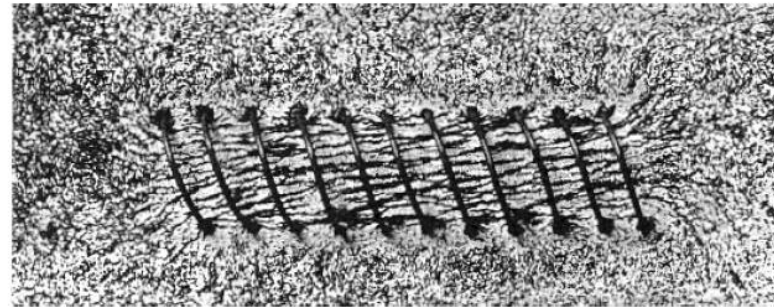
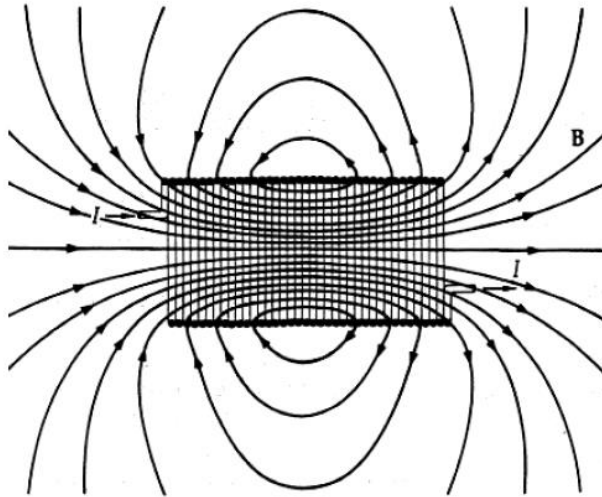


SORGENTI DI CAMPO MAGNETICO (STATICO)

Solenoido:



Linee di Forza:



CAMPO MAGNETICO

Caratteristiche Forza:

$$F \propto q$$

$$F \propto v$$

$$F \propto \sin \theta$$

$F \perp$ al piano di v e B

Il **verso di F** dipende da quelli di **V e B**

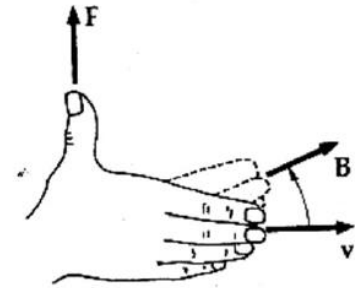
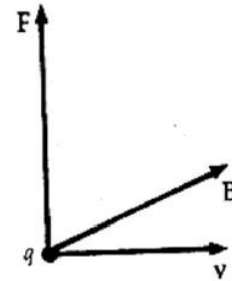
e dal **segno di q** (qv, B e F =terna destrorsa)

Modulo B = costante di proporzionalità:

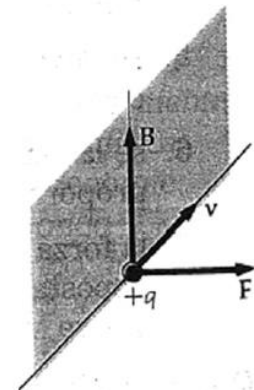
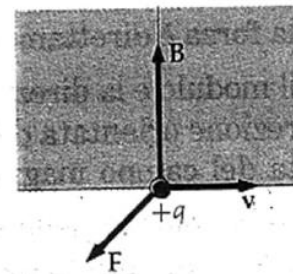
$$\frac{F}{qv \sin \theta} = B \Rightarrow F = qvB \sin \theta$$

Unità di misura SI: Tesla

$$\frac{1\text{N}}{1\text{C} \cdot 1\frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1\frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = 1\text{T} \quad (= 10^4 \text{ G})$$



Esempi grafici:



L'altra faccia della medaglia: onde e radiazioni

Corpi dotati di massa

Onde (perturbazioni) che si propagano senza trasportare massa. Sono "energia in movimento"

Entrambi sono in grado di trasportare Energia cioè riescono a compiere lavoro

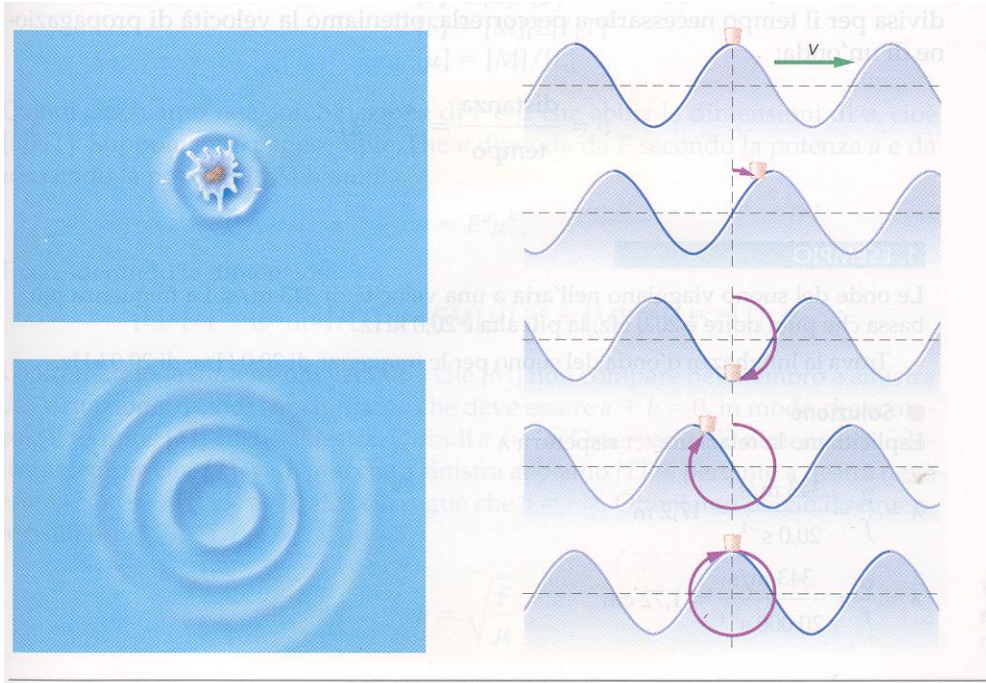
A Livello microscopico:

Corpi con massa \leftrightarrow particelle

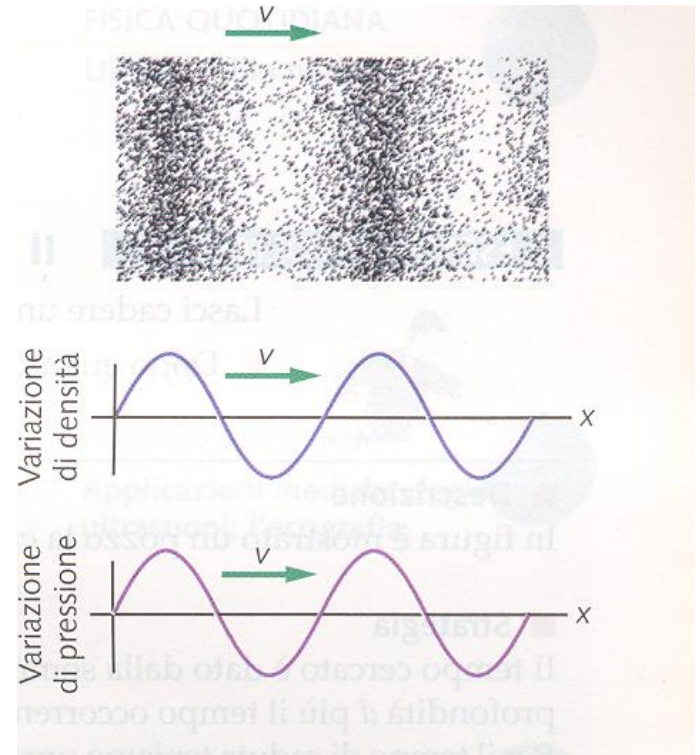
Onde \leftrightarrow radiazioni

Ma $E = mc^2$ cioè
due facce della
stessa medaglia

Le onde che conosciamo



Onde nell'acqua: la perturbazione si sposta ma, dopo il suo passaggio, ogni molecola nel liquido torna nella sua posizione iniziale



Onde acustiche: in un fluido (ad es. nell'aria) si propaga una perturbazione della pressione (cioè la densità dell'aria cambia al passaggio dell'onda)

Parametri caratteristici di un'onda



Velocità di propagazione: v = spazio percorso nell'unità di tempo

Periodo: tempo intercorso tra il passaggio di due massimi (o minimi); $T = \lambda/v$

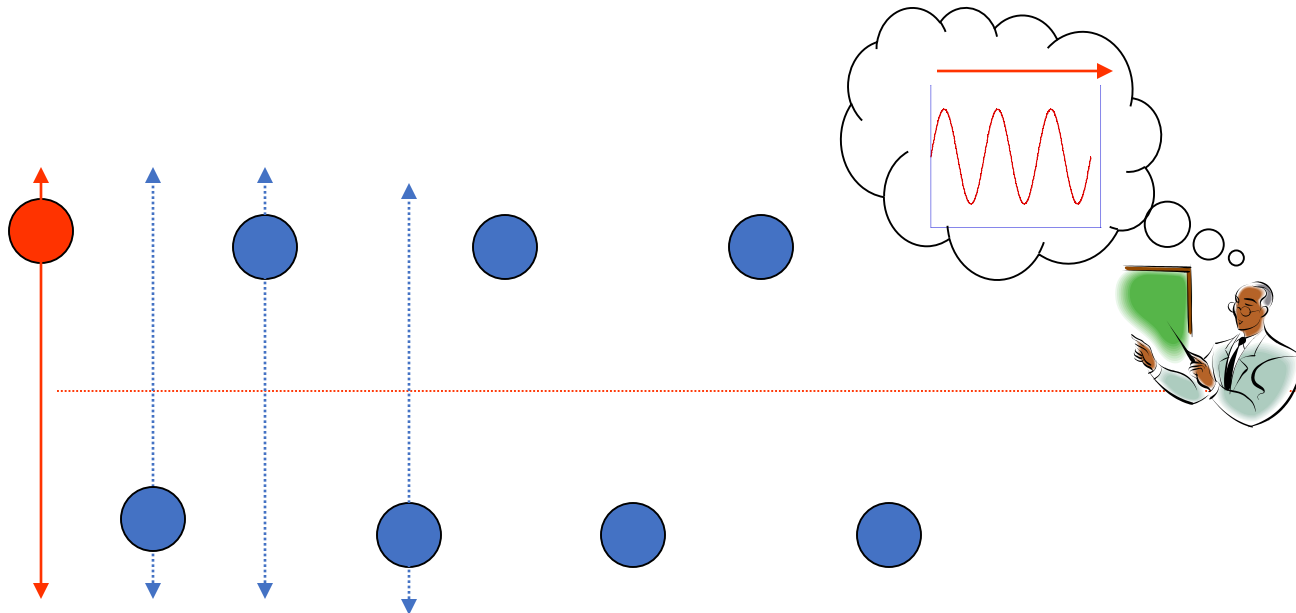
Frequenza: numero di passaggi nell'unità di tempo; $\nu = 1/T = v/\lambda$

Cosa trasporta un'onda?

In effetti ogni onda trasmette ("sposta") energia (cioè capacità di compiere lavoro) senza trasportare materia. In altri termini un'onda è una perturbazione (cioè una variazione) dello stato di un sistema che si propaga nello spazio.

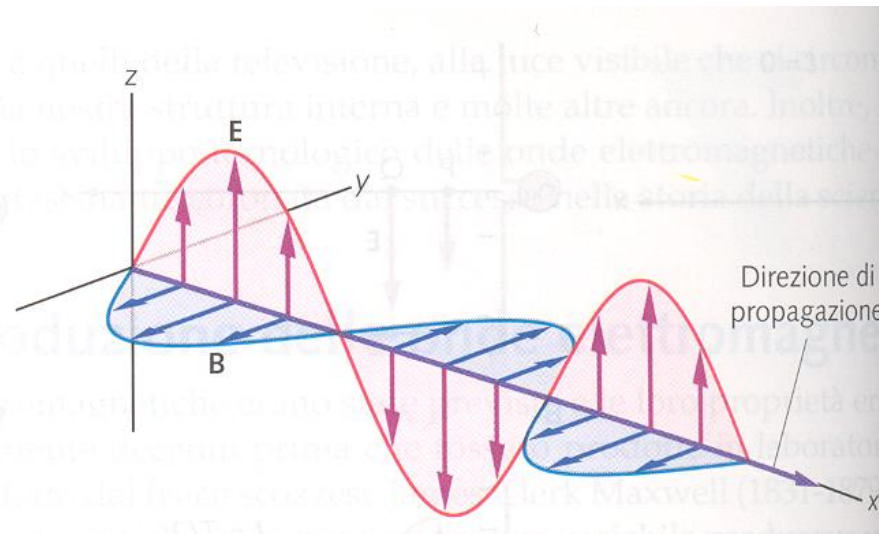
Se la perturbazione coinvolge campi (forze) elettrici e magnetici allora si parla di un'onda elettro-magnetica...

Esempio: Supponiamo che un elettrone venga fatto oscillare continuamente lungo Y ma senza muoversi nella direzione X...



Gli elettroni vicini saranno "trascinati" dalla forze elettriche a seguire il movimento del primo e in ciascuna posizione l'oscillazione si ripete ma ad istanti via via successivi. Un osservatore "vede" una perturbazione che si sposta.

Un po' più precisamente..



Le onde elettromagnetiche, indipendentemente dalla loro frequenza, si spostano nel VUOTO tutte con la stessa velocità:

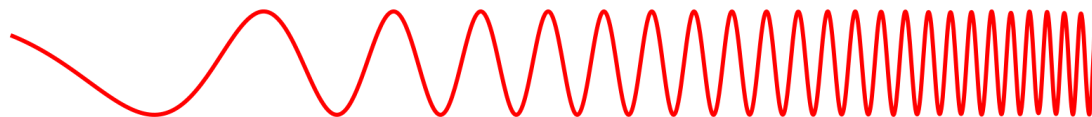
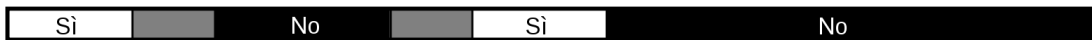
$$v_{o.e.} = c = 3.00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Secondo la teoria della relatività, finora mai smentita, c è la velocità massima che una radiazione od un corpo materiale possono assumere.

Nella materia $v_{o.e.} < c$ e cambia con la densità (g/cm^3) del materiale. Ad esempio in acqua e/o vetro $v_{o.e.} \approx 2/3 c$

Lo Spettro Elettromagnetico

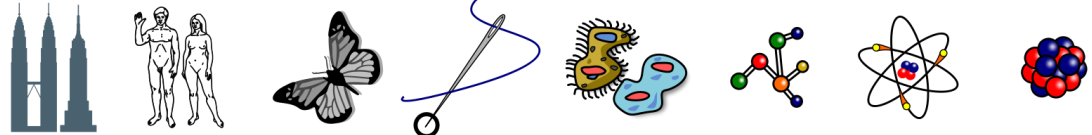
Penetra l'atmosfera terrestre?



Tipo di radiazione
Lunghezza d'onda (m)

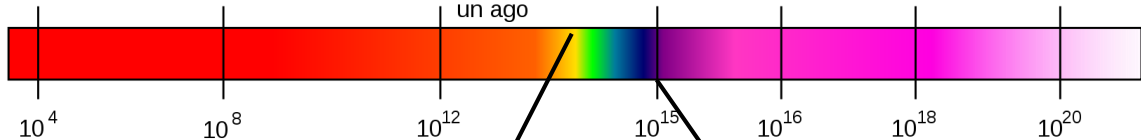
Radio 10^3 **Microonde** 10^{-2} **Infrarosso** 10^{-5} **Visibile** 0.5×10^{-6} **Ultravioletto** 10^{-8} **Raggi X** 10^{-10} **Raggi Gamma** 10^{-12}

Scala approssimativa della lunghezza d'onda

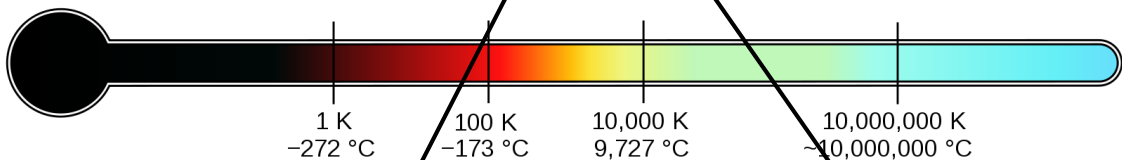


Edifici Esseri umani Farfalle Punta di un ago Protozoi Molecole Atomi Nuclei atomici

Frequenza (Hz)



Temperatura degli oggetti alla quale questa radiazione è la più intensa
lunghezza d'onda emessa



$$f = c/\lambda$$

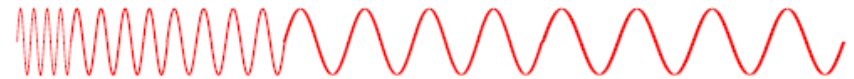
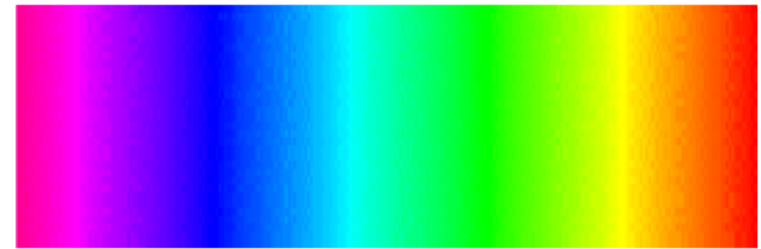
$$E = hf$$

$$f = 1/T$$



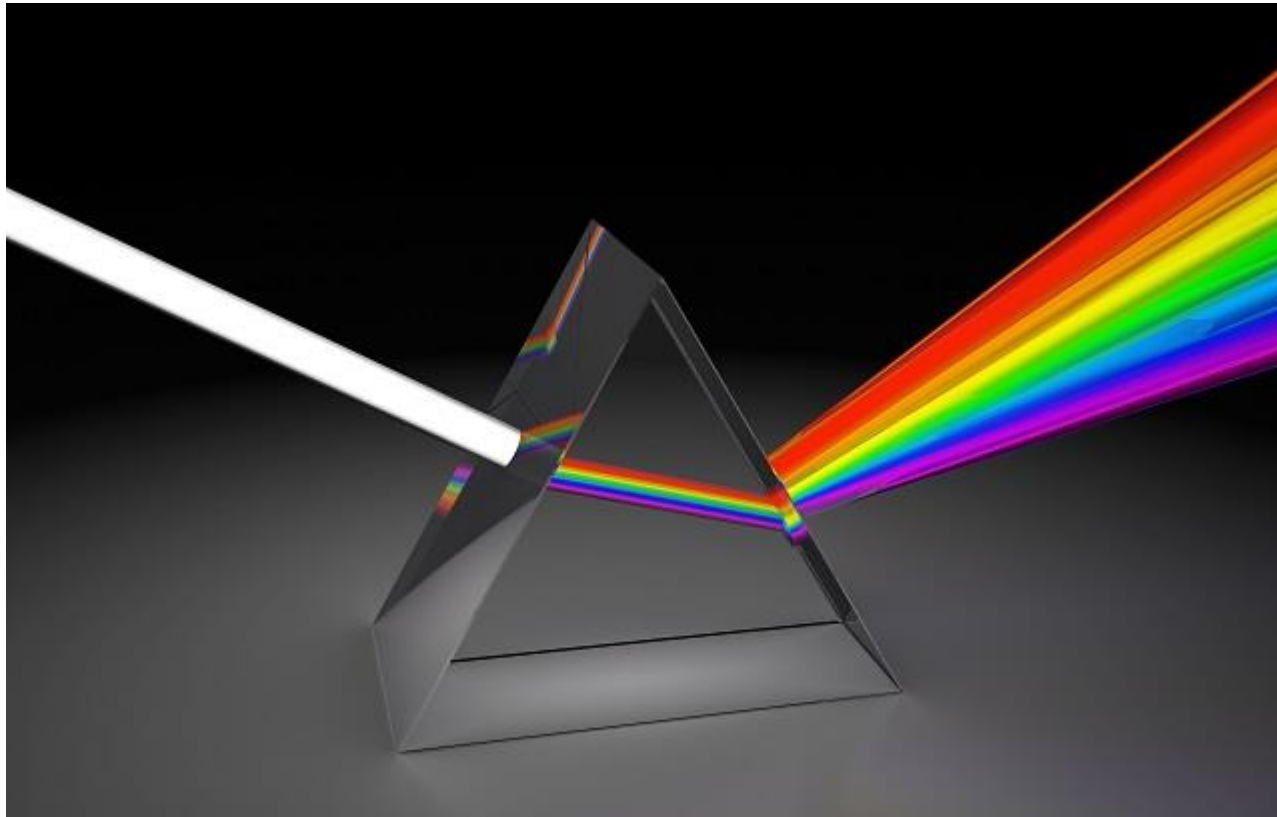
I Colori e la lunghezza d'onda λ

COLORE	LUNGHEZZA D'ONDA (nm)
violetto	380-430
azzurro	430-470
verde	470-520
giallo	520-590
arancione	590-610
rosso	610-750



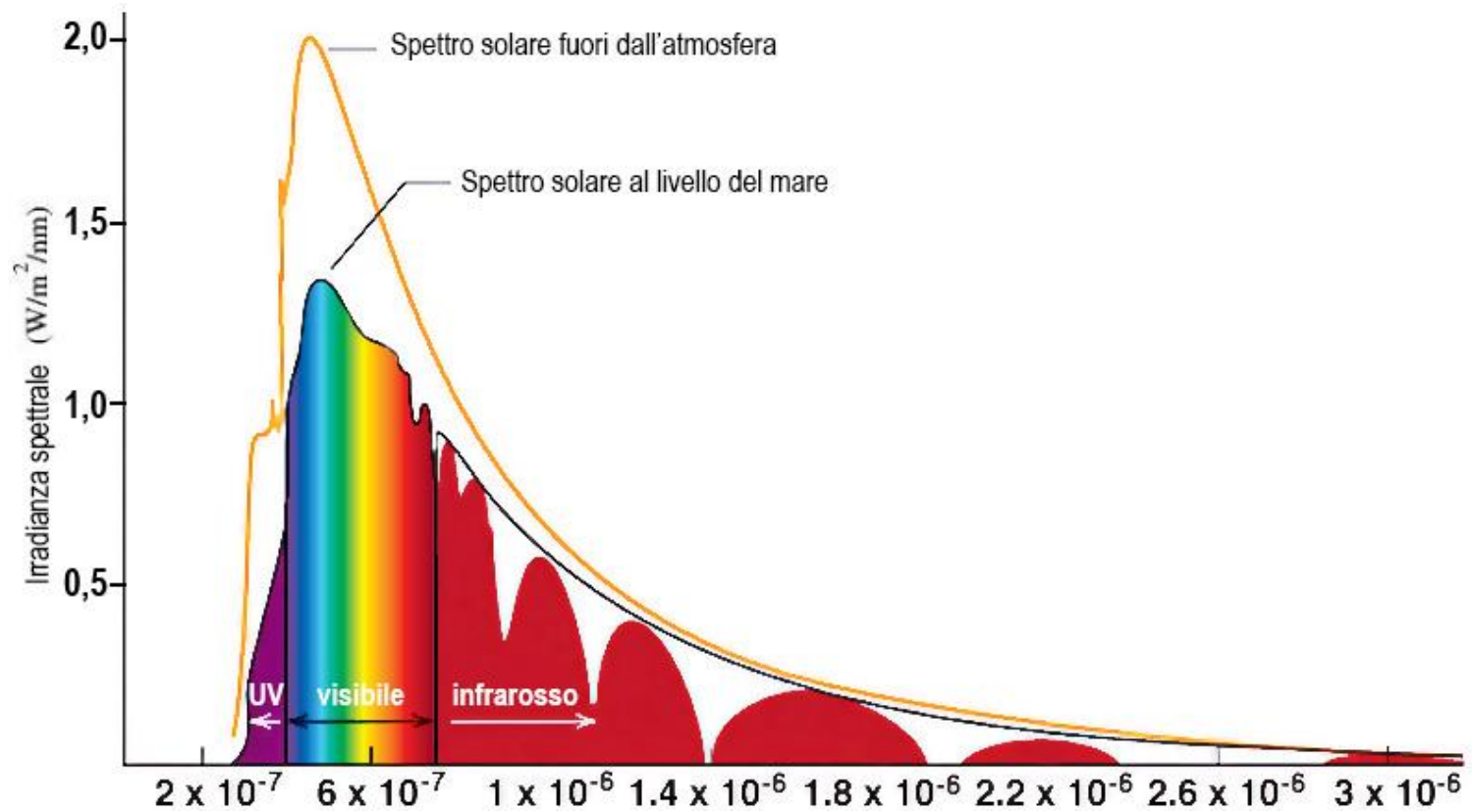
Ciascun colore corrisponde ad una radiazione elettromagnetica di diversa lunghezza d'onda

Lo Spettro Visibile: i Colori



Il Prisma è in grado di separare i vari fotoni colorati presenti nella luce bianca.

La luce: lo spettro solare



L'Estinzione delle onde elettromagnetiche

E' esperienza comune che un raggio luminoso si attenua nell'attraversare un qualsiasi materiale.

Questa attenuazione è descritta dalla legge di Lambert-Beer, che stabilisce che in un mezzo omogeneo (no discontinuità o le discontinuità si presentano con la stessa distribuzione in tutto il mezzo) l'intensità di un fascio di radiazione decresce esponenzialmente man mano che si propaga.

La rapidità con cui si estingue è allora data da un coefficiente, detto appunto di "estinzione", che caratterizza il mezzo di propagazione.

L'espressione matematica della legge è allora:

$$I(x) = I_0 \exp^{-\mu x},$$

in cui μ rappresenta il coefficiente di estinzione e x lo spessore del materiale attraversato.

Al valore totale di questo coefficiente di estinzione contribuiscono due differenti fenomeni: la **diffusione** e l'**assorbimento**. L'importanza dei due varia a seconda del tipo di materiale considerato e della lunghezza d'onda dei fotoni che lo attraversano

La Diffusione delle onde elettromagnetiche

Nel primo caso l'attenuazione prodotta dall'attraversamento della sostanza è dovuta alla **diffusione** (a causa della presenza di discontinuità nel mezzo, tipo inclusioni, bolle d'aria, di acqua ecc.) che causano la diffusione praticamente casuale della radiazione che attraversa il mezzo. Vedendola macroscopicamente, è come se ogni discontinuità o difetto si comportasse come un piccolo specchio.

Esempio: il cielo!

In questo caso il fenomeno prende il nome di «scattering Rayleigh»: questo avviene quando le dimensioni delle particelle (dei difetti) **sono molto più piccole della lunghezza d'onda della radiazione.**

$$Scattering_{Rayleigh} \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

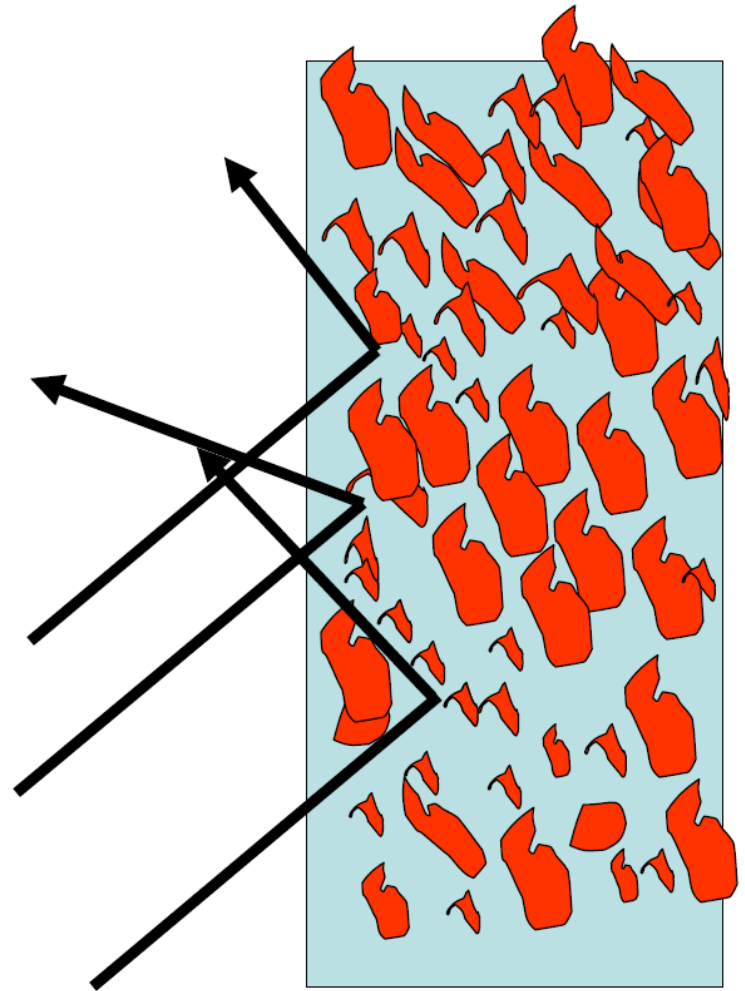
L'opacità è data dunque dal fatto che il raggio e.m., incontrando un mezzo con particolari caratteristiche (anche se potenzialmente trasparente), viene deviato in più o meno tutte le direzioni, causando di fatto una **attenuazione della radiazione messa nel mezzo.** E' bene comunque precisare che l'energia associata alla radiazione entrante viene solo ridistribuita in tutte le direzioni, senza che subisca trasformazioni consistenti: la perdita di energia associata all'onda elettromagnetica avviene principalmente lungo la direzione del raggio incidente.



I grani del materiale diffondono la luce.

Se il materiale non assorbe la luce la componente luce riflessa risulta bianca (gesso carta cotone neve latte).

Ecco spiegato perché macinando un vetro esso diventa bianco.



L'assorbimento delle onde elettromagnetiche

L'altra possibilità, è che il fenomeno responsabile dell'estinzione sia ***l'assorbimento***, che consiste **nell'acquisizione, da parte della materia, della energia di radiazioni elettromagnetiche**. Esso avviene in tempi brevissimi ed è seguito da una rapida ri-emissione dell'energia assorbita, tipicamente sotto forma di calore.

A differenza del caso precedente, qui si ha una diminuzione dell'energia associata all'onda elettromagnetica, cioè non c'è redistribuzione in altre direzioni ma semplicemente un "assorbimento".

Questo può avvenire a diverse frequenze a seconda del fenomeno interessato nel processo:

- Le onde radio: interagiscono sullo spin dell'elettrone.
- Le microonde: inducono rotazioni nella molecola.
- Le radiazioni infrarosse: amplificano le naturali oscillazioni dei legami.
- Le radiazioni visibili e ultraviolette: riescono a eccitare gli elettroni di valenza.
- I raggi X: interagiscono e estraggono gli elettroni più vicini al nucleo

Diffusione e Assorbimento

Schematizziamo un evento di assorbimento: una radiazione di una certa lunghezza d'onda (colore, se siamo nel visibile) investe un sistema legato nucleo-elettrone: se la radiazione ha la lunghezza d'onda corrispondente all'energia con cui il sistema è legato, allora “risuona” con il sistema e si ha l'assorbimento della radiazione e il cambiamento energetico del sistema.

Possiamo anche pensare ogni particella presente nel materiale sia costituita da un insieme di dipoli che, venendo eccitati da un campo elettromagnetico, oscillano alla frequenza della radiazione che li investe re-irradiando (diffusione) in ogni direzione e/o trasformando parte dell'energia incidente in altre forme di energia (assorbimento).

La situazione si complica all'aumentare della «complessità» del materiale: il sistema può avere crescenti tipi di interazioni con energie di legame differente a cui corrispondono altrettante frequenze di assorbimento.